

Měření na izolačním transformátoru pro biomedicínskou techniku – Laboratorní úloha

Measurement on Insulating Transformer for Biomedical Engineering –
Laboratory Exercise

Daniel Přeček

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Kašík, Ph.D.

Ostrava, 2021

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Vladimíru Kašíkovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a podporu při psaní bakalářské práce. Dále také mé přítelkyni Magdě za neutuchající podporu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá měřením unikajících proudů a kapacit vinutí na izolačním transformátoru. Práce by měla v konečném řešení pomoci studentům biomedicíny v lepším pochopení problematiky zdravotnických norem, revizí zdravotnických přístrojů a unikajících proudů. Teoretická část popisuje konstrukci izolačního transformátoru a jeho využití v biomedicině. Dále se v této části práce rozebírají druhy měření unikajících proudů s jejich následným výběrem pro měření. V dalších kapitolách byl sestaven návrh koncepce laboratorní úlohy, výběr vhodných členů pro měření, sestavení audio zesilovače a následná realizace navržených měření. Výsledkem práce je vypracovaná laboratorní úloha, která má studentům posloužit jako výukový materiál pro demonstraci unikajících proudů. V závěru byla práce zhodnocena z pohledu jejího přínosu pro studium.

Klíčová slova

Izolační transformátor; zdravotnické elektrické přístroje; normy ve zdravotnictví; testování zdravotnických přístrojů; unikající proudy

Abstract

This bachelor thesis deals with the measurement of leakage currents and winding capacities on an isolating transformer. In the final solution, the work should help students of biomedicine in a better understanding of the issue of medical standards, revisions of medical devices and leakage currents. The theoretical part describes the construction of an isolation transformer and its use in biomedicine. Furthermore, in this part of the work, the types of measurements of leakage currents with their subsequent selection for measurement are discussed. In the following chapters, a proposal for the concept of the laboratory task, the selection of suitable members for measurements, the assembly of an audio amplifier and the subsequent implementation of the proposed measurements were compiled. The result of the work is a laboratory task, which is to serve as a teaching material for students to demonstrate leakage currents. In the end, the work was evaluated in terms of its contribution to the study.

Keywords

Insulating transformer; medical electronic instrumentation; standards in healthcare; testing of medical devices; leaking currents

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	- 7 -
Seznam obrázků.....	- 8 -
Seznam tabulek	- 10 -
Úvod	- 11 -
1 Seznámení se s konstrukcí izolačního transformátoru a jeho využitím v biomedicině ...	- 12 -
1.1 Konstrukce transformátorů	- 12 -
1.1.1 Magnetický obvod	- 12 -
1.1.2 Vinutí (elektrický obvod).....	- 13 -
1.1.3 Mechanické části	- 13 -
1.1.4 Chladicí nádoba a příslušenství	- 13 -
1.2 Rozdělení transformátorů.....	- 13 -
1.2.1 Dle počtu fází.....	- 14 -
1.2.2 Dle magnetického obvodu	- 14 -
1.2.3 Dle způsobu chlazení	- 15 -
1.2.4 Dle počtu vinutí	- 15 -
1.3 Princip činnosti transformátorů.....	- 17 -
1.4 Poruchy a ochrany transformátorů	- 18 -
1.4.1 Poruchy transformátorů	- 18 -
1.4.2 Ochrany transformátorů.....	- 18 -
1.5 Izolační transformátor.....	- 19 -
1.6 Sítě a normy ve zdravotnictví.....	- 19 -
1.6.1 Síť IT	- 20 -
1.7 Unikající proudy	- 21 -
2 Studium metod měření unikajících proudů.....	- 22 -
2.1 Přímá metoda měření unikajících proudů	- 22 -
2.2 Nepřímá (alternativní) metoda měření unikajících proudů.....	- 23 -
2.3 Rozdílová (diferenciální) metoda měření unikajících proudů.....	- 24 -
3 Výběr metod měření unikajícího proudu	- 25 -
3.1 Přímá metoda	- 25 -
3.2 Nepřímá metoda	- 25 -
3.3 Rozdílová metoda.....	- 25 -

4	Návrh koncepce laboratorní úlohy s izolačním transformátorem pro biomedicínské účely	- 26 -
4.1	Návrh a výběr členů.....	- 26 -
4.1.1	Zdroj signálu.....	- 26 -
4.1.2	Zesilovač signálu.....	- 26 -
4.1.3	Výběr transformátorů.....	- 31 -
4.2	Návrh měřících metod.....	- 39 -
4.2.1	Návrh měřícího obvodu pro ověření předpokládaných vlastností	- 39 -
4.2.2	Měření unikajících proudů přímou metodou.....	- 41 -
4.2.3	Měření unikajících proudů nepřímou metodou	- 42 -
4.2.4	Výpočet a vyhodnocení parazitní kapacity C_p	- 43 -
5	Realizace navržených měření	- 45 -
5.1	Měření unikajících proudů.....	- 45 -
5.1.1	Měření unikajících proudů přímou metodou	- 52 -
5.1.2	Měření unikajících proudů nepřímou metodou	- 53 -
5.2	Výpočet a vyhodnocení parazitní kapacity C_p	- 55 -
6	Vypracování příslušné laboratorní úlohy	- 58 -
6.1	Cíl úlohy	- 59 -
6.2	Zadání	- 59 -
6.3	Předpokládané znalosti	- 59 -
6.4	Použité vybavení	- 59 -
6.5	Teoretický rozbor	- 59 -
6.6	Pracovní postup.....	- 64 -
6.6.1	Postup k bodu č.1 zadání	- 64 -
6.6.2	Postup k bodu č.2 zadání	- 65 -
6.6.3	Postup k bodu č.3 zadání	- 65 -
6.6.4	Postup k bodu č.4 zadání	- 65 -
6.7	Výsledky měření	- 67 -
6.7.1	Výsledky měření bodu č. 1 zadání.	- 67 -
6.7.2	Výsledky měření bodu č. 2 zadání.	- 69 -
6.7.3	Výsledky měření bodu č. 3 zadání.	- 70 -
6.7.4	Výsledky měření bodu č. 4 zadání.	- 71 -
6.8	Kontrolní otázky	- 73 -

6.9 Závěr.....	- 73 -
7 Zhodnocení dosažených výsledků.....	- 75 -
8 Použitá literatura	- 77 -
Seznam příloh.....	- 80 -

Seznam použitých symbolů a zkratek

Ω	Odpor [Ohm]
BTK	Bezpečnostně technická kontrola
C_p	Parazitní kapacita [F, Farad]
f	Frekvence [Hz, Hertz]
JIP	Jednotka intenzivní péče
I, I_p	Proud, poruchový proud [A, Ampér]
IMD	Hlídač izolačního stavu
K_s	Konstanta pro přepočet naměřeného napětí na síťové
p	Transformační poměr
SÚKL Praha	Státní ústav pro kontrolu léčiv
U_{p-p}, U_M, U	Napětí mezi špičkami, Amplitudové napětí, Efektivní napětí [V, Volt]
VA	Voltampér, jednotka elektrického zdánlivého výkonu (příkonu)
W	Watt, jednotka činného výkonu

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Jádrový (vlevo) a plášťový (vpravo) typ transformátoru (převzato z [2]).....	- 14 -
Obrázek 1.2 Typy plechů pro plášťový transformátor: a) tvar M, b) tvar EI (převzato z [11]).....	- 15 -
Obrázek 1.3 Elektromagnetické schéma (převzato z [1])	- 17 -
Obrázek 2.1 Schéma měření přímou metodou (převzato z [19]).....	- 23 -
Obrázek 2.2 Schéma měření nepřímou metodou (převzato z [19])	- 23 -
Obrázek 2.3 Schéma měření rozdílovou metodou (převzato z [19])	- 24 -
Obrázek 4.1 Doporučené zapojení obvodu TDA2030 (převzato z [25])	- 27 -
Obrázek 4.2 Zapojení obvodu TDA2030	- 28 -
Obrázek 4.3 Sestavený audio zesilovač TDA2030 v bodě 4.1.2	- 29 -
Obrázek 4.4 Test zapojení zesilovače TDA 2030 o frekvenci 1 kHz a generovaném napětí U 230 mV v bodě 4.1.2	- 30 -
Obrázek 4.5 Test zapojení zesilovače TDA 2030 o frekvenci 1 kHz a generovaném napětí U 353 mV v bodě 4.1.2	- 31 -
Obrázek 4.6 Vybraný transformátor 1	- 32 -
Obrázek 4.7 Schéma rozložení vinutí transformátoru 1	- 33 -
Obrázek 4.8 Vybraný transformátor WA 942	- 34 -
Obrázek 4.9 Schéma rozložení vinutí transformátoru WA 942.....	- 35 -
Obrázek 4.10 Schéma zapojení zesilovače s transformátorem WA942.....	- 36 -
Obrázek 4.11 Test zapojení zesilovače TDA 2030 s transformátorem WA 942 o frekvenci 1 kHz a generovaném napětí U 230 mV v bodě 4.1.3	- 37 -
Obrázek 4.12 Vybraný transformátor 9WN	- 38 -
Obrázek 4.13 Schéma rozložení vinutí transformátoru 9 WN	- 39 -
Obrázek 4.14 Měřicí obvod pro metodu měření unikajících proudů v bodě 4.2.1	- 40 -
Obrázek 4.15 Schéma zapojení pro přímou metodu v bodě 4.2.2	- 41 -
Obrázek 4.16 Schéma zapojení pro nepřímou metodu v bodě 4.2.3.....	- 42 -
Obrázek 4.17 Schéma zapojení simulovaného obvodu v bodě 4.2.4.....	- 43 -
Obrázek 5.1 Zapojení obvodu měření dle schématu 4.14	- 45 -
Obrázek 5.2 Měření frekvence a napětí na rezistoru kanálem 1 při frekvenci 13 kHz pro transformátor 1 v bodě 5.1	- 47 -
Obrázek 5.3 Měření frekvence a napětí na rezistoru kanálem 1 při frekvenci 9 kHz pro transformátor WA 942 v bodě 5.1	- 48 -
Obrázek 5.4 Měření frekvence a napětí na rezistoru kanálem 1 při frekvenci 18 kHz pro transformátor WA 942 v bodě 5.1	- 48 -
Obrázek 5.5 Měření frekvence a napětí na rezistoru kanálem 1 při frekvenci 9 kHz pro transformátor 9WN v bodě 5.1.....	- 50 -
Obrázek 5.6 Graf závislosti unikajících proudů na frekvenci pro transformátor 1 v bodě 5.1.....	- 50 -

Obrázek 5.7 Graf závislosti unikajících proudů na frekvenci pro transformátor WA 942 v bodě 5.1	- 51 -
Obrázek 5.8 Graf závislosti unikajících proudů na frekvenci pro transformátor 9WN v bodě 5.1 ..	- 51 -
Obrázek 5.9 Vyhodnocení přesnosti metod měření unikajících proudů v bodě 5.1.2	- 54 -
Obrázek 5.10 Schéma simulovaného obvodu v rozhraní falstad v bodě 5.2.....	- 55 -
Obrázek 5.11 Graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci při rozdílných parazitních kapacitách v bodě 5.2.....	- 57 -
Obrázek 6.1 Schéma zapojení pro přímou metodu v bodě 6.5	- 61 -
Obrázek 6.2 Schéma zapojení pro nepřímou metodu v bodě 6.5	- 62 -
Obrázek 6.3 Zapojení zesilovače TDA2030 v bodě 6.6.1.....	- 64 -
Obrázek 6.4 Zapojení obvodu dle schématu v bodě 6.7.1.....	- 67 -
Obrázek 6.5 Záznam výstupního napětí zesilovače v bodě 6.7.1	- 68 -
Obrázek 6.6 Graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci pro obě metody v bodě 6.7.3	- 71 -
Obrázek 6.7 Graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci pro vybrané transformátory v bodě 6.7.4	- 72 -

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 Katalogové údaje obvodů TDA (převzato z [24])	- 27 -
Tabulka 4.2 Rozpis součástek, použitých na zesilovači TDA2030	- 28 -
Tabulka 4.3 Určení účinnosti a korekce ztrát pro výkon transformátoru.....	- 33 -
Tabulka 4.4 Tabulka pro měření unikajícího proudu v bodě 4.2.1	- 41 -
Tabulka 4.5 Tabulka pro měření unikajícího proudu přímou metodou v bodě 4.2.2.....	- 42 -
Tabulka 4.6 Tabulka pro měření unikajícího proudu nepřímou metodou v bodě 4.2.3	- 43 -
Tabulka 4.7 Tabulka pro měření unikajících proudů v bodě 4.2.4	- 44 -
Tabulka 5.1 Tabulka naměřených hodnot pro transformátor 1 v bodě 5.1	- 46 -
Tabulka 5.2 Tabulka naměřených hodnot pro transformátor WA 942 v bodě 5.1	- 47 -
Tabulka 5.3 Tabulka naměřených hodnot pro transformátor 9WN v bodě 5.1	- 49 -
Tabulka 5.4 Tabulka naměřených hodnot unikajícího proudu přímou metodou v bodě 5.1.1	- 52 -
Tabulka 5.5 Tabulka naměřených hodnot unikajícího proudu nepřímou metodou v bodě 5.1.2	- 53 -
Tabulka 5.6 Průměr hodnot unikajících proudů v bodě 5.1.2	- 54 -
Tabulka 5.7 Tabulka naměřených hodnot unikajících proudů v bodě 5.2	- 55 -
Tabulka 6.1 Měření unikajících proudů na transformátorech v bodě 6.6.1.....	- 65 -
Tabulka 6.2 Tabulka naměřených hodnot unikajících proudů v bodě 6.6.4.....	- 66 -
Tabulka 6.3 Naměřené hodnoty pro transformátor 9WN v bodě 6.7.1.....	- 68 -
Tabulka 6.4 Naměřené hodnoty pro transformátor WA 942 v bodě 6.7.1	- 69 -
Tabulka 6.5 Naměřené hodnoty pro transformátor 1 v bodě 6.7.1	- 69 -
Tabulka 6.6 Naměřené hodnoty pro transformátor 9WN v bodě 6.7.2.....	- 69 -
Tabulka 6.7 Naměřené hodnoty pro transformátor WA 942 v bodě 6.7.2	- 70 -
Tabulka 6.8 Naměřené hodnoty pro transformátor 1 v bodě 6.7.2	- 70 -
Tabulka 6.9 Průměr hodnot metody přímé a nepřímé v bodě 6.7.3.....	- 70 -
Tabulka 6.10 Tabulka naměřených hodnot unikajícího proud v bodě 6.7.4	- 71 -

Úvod

Transformátory jsou určeny pro napájení různých aplikací. Jeden z několika typů transformátoru se nazývá izolační. Takový transformátor má galvanicky oddělená vstupní a výstupní vinutí. Využití najde i ve zdravotnictví jako ochranné opatření při provozu přístrojů ve zdravotnických prostorách, přesněji se jedná o elektrické oddělení napájení, dalších obvodů a země od spotřebiče při jeho poruše. Ochranné oddělení je z důvodu bezpečnosti nezbytné při práci s nízkým napětím (230 V).

Elektrické stroje musí splňovat určité požadavky, ať už se jedná o technický stav přístroje či jeho funkčnost. I tyto přístroje časem stárnou, a proto potřebují pravidelnou kontrolu či případnou údržbu. Těmito úkony se zabývají například revizní technici, kteří postupují dle stanovených metod a postupů. Tyto postupy jsou určovány jedním z mnoha odvětví vědního oboru metrologie, zkušebnictvím.

Ve zdravotnictví jsou takové úkony revizních techniků nazývány bezpečnostně technickou kontrolou (BTK) a jsou legislativně stanoveny. V tomto odvětví se BTK používá převážně ke kontrole správné funkčnosti, stavu a bezpečnosti zdravotnických přístrojů. BTK se obvykle pravidelně provádí s periodicitou jednoho roku. K provádění servisu daných zdravotnických prostředků musejí mít v dnešní době pracovníci školení od daného výrobce. Dokumentaci o školení kontroluje například SÚKL Praha, který dále kontroluje také dokumentaci o dodržování zákonem (zákon č. 268/2014 Sb.) stanovených periodických kontrolách, záznamy o opravách, instruktážích či přítomnosti návodu v českém jazyce. Během nouzového stavu v roce 2020 vydal SÚKL Praha prohlášení o možném používání zdravotnických prostředků bez BTK za určitých podmínek.

Unikající proudy jsou jednou z veličin, které se při BTK přeměřují. Ty se z důvodu bezpečnosti musejí kontrolovat, aby nepřekročily maximální povolenou bezpečnou hodnotu. U nepoškozeného spotřebiče se tento proud nazývá konstrukční. Ten v bezporuchovém stavu protéká do neživých částí a do země. Druhou složkou unikajících proudů je proud, který protéká při poruše. Unikající proudy norma rozděluje na proud, který protéká ochranným vodičem a dotykový proud, který protéká přes obsluhu či pacienta do země. Zejména při přímém kontaktu živé části přístroje při zákroku je nezbytné zamezit překročení hraniční hodnoty unikajících proudů.

Hlavním cílem bakalářské práce bylo sestavení laboratorní úlohy, pomocí které si budou moci studenti biomedicínské techniky sami demonstrovat a vyhodnocovat unikající proudy.

Výsledkem práce je vypracovaná laboratorní úloha, která má studentům posloužit jako výukový materiál pro demonstraci unikajících proudů.

1 Seznámení se s konstrukcí izolačního transformátoru a jeho využitím v biomedicině

Na transformátor lze z technického hlediska pohlízet jako na netočivý elektrický stroj, můžeme tedy říct, že transformátor nemá žádné rotační části. Z názvu transformátorů vyplývá, že jsou to stroje, které transformují elektrickou energii, jinak řečeno přenáší elektrickou energii z jedné části obvodu na druhou. Energie se však při transformaci nemění a zůstává tedy po vstupu do transformace i na výstupu energií elektrickou. K tomu dochází díky transformátorové vazbě neboli vzájemné elektromagnetické indukci. [1], [3]

Transformátory mají širokou škálu využití. Výkony transformátorů se pohybují mezi jednotkami VA až do stovek MVA. Lze je využít v místech, kde je potřeba snižovat nebo zvyšovat napětí nebo také v místech, kde je potřebná změna střídavého proudu, ve smyslu jeho kmitočtu. Dále se také využívá pro změnu počtu fází. [1], [4]

Využití naleznou zejména pro přenos elektrické energie a její rozvod sítí či přeměnu elektrického proudu v různých zařízeních. Dle jejich konstrukce se pak různé druhy tohoto netočivého elektrického stroje používají v mnoha odvětvích, jako jsou regulační a automatizační zařízení, radiotechnika, průmyslová zařízení a mnoho dalších. [1], [4]

1.1 Konstrukce transformátorů

Transformátory se ze základního principu dělí na tyto části:

1. Magnetický obvod
2. Elektrický obvod nebo také vinutí
3. Mechanické části
4. Chladicí nádoba a příslušenství [5]

1.1.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod má velmi důležitou funkci. Tato část se stará o to, aby převážná část magnetického toku byla usměrněna a stala se tokem činným. Skládá se z tzv. transformátorových plechů, které mívají většinou tloušťku okolo 0,35 mm nebo také 0,5 mm. Vzhledem k Foucaultovým (vířivým) proudům, které se v transformátoru indukují, jsou plechy od sebe navzájem izolovány. Transformátorové plechy tedy mívají na obou stranách izolační vrstvu ze skelného filmu a fosfátu, celková úprava má název „Carlite“, dříve se izolovaly papírem. Touto snahou o vzájemnou izolaci plechů se snižují ztráty vířivými proudy. Podle využití transformátoru a přenášené frekvence se volí materiál, ze kterého se transformátorové plechy vyrábí. Feromagnetický materiál se využívá pro vyšší frekvence v odvětvích jako je radiotechnika, jelikož se vyznačuje vysokým měrným odporem oproti kovovým magnetickým materiálům. Dalším používaným materiálem jsou orientované, válcované plechy, které se

používají například v energetice pro nižší frekvence. Tyto plechy však mívají ztráty v železe, a proto se pro snížení této skutečnosti legují křemíkem. [3], [6], [7]

1.1.2 Vinutí (elektrický obvod)

K výrobě vinutí se převážně využívají dva materiály. Více častým materiálem jsou měděné vodiče různých průřezů (kruhové, čtvercové nebo obdélníkové). Druhým materiálem jsou pak hliníkové vodiče, které však mají, v poměru s měděnými, horší vlastnosti a také odlišnou cenovou hladinu.

Elektrický obvod musí splňovat řadu kritérií, aby mohl transformátor správně fungovat:

- Mechanická pevnost – odolnost vinutí vůči mechanickému namáhání při zkratech (působení elektromagnetických sil) či montáži.
- Elektrická pevnost – pevnost izolace, která musí vydržet jak krátkodobá přepětí, tak i dlouhodobé působení elektrického pole.
- Technologická proveditelnost – poměr kvality a kvantity.
- Odolnost vůči tepelnému namáhání – tuto hodnotu určuje přiřazená hodnota teploty izolace v dané třídě.
- Ekonomika provozu – norma udávající hranici elektrických ztrát. [4]

1.1.3 Mechanické části

Mechanické části se starají o mechanickou pevnost transformátoru a jeho upevňování. [5]

1.1.4 Chladicí nádoba a příslušenství

Chladicí nádoba má tři části:

- Olejovou vanu
- Vlnovec harmonického tvaru
- Nosný rám

Pro chlazení se využívá buďto olej (u výkonných a velkých transformátorů) nebo vzduch (u transformátorů s nižším výkonem a menších rozměrů). [8]

1.2 Rozdělení transformátorů

Transformátory se dělí do několika skupin podle jejich konstrukce:

1. Počet fází

2. Magnetický obvod
3. Způsob chlazení
4. Počet vinutí

1.2.1 Dle počtu fází

- Jednofázové transformátory – transformátory o malém výkonu (10 až 100 W), využití při transformaci na nižší U.
- Trojfázové transformátory – až stovky MW (megawattů), využití najdou při distribuci elektrické energie a jejím přenosu.
- Speciální transformátory – charakterizují se dvěma nebo více fázemi. [1], [11]

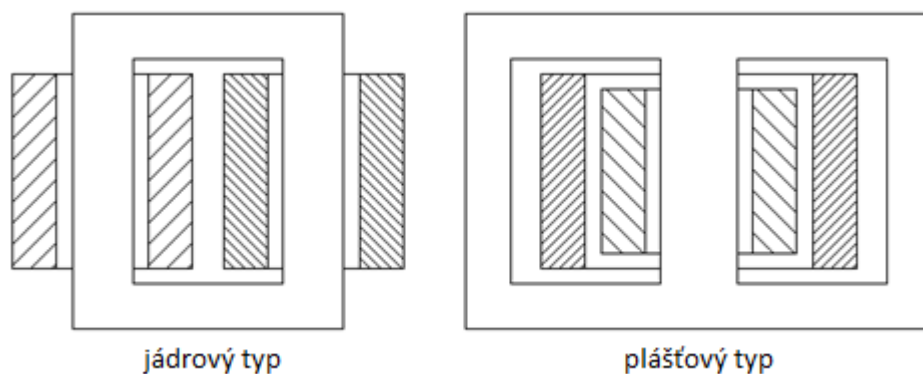
1.2.2 Dle magnetického obvodu

Magnetické obvody se dělí dle svého provedení:

- Jádrové
- Plášťové
- Toroidní [5]

Jádrové transformátory

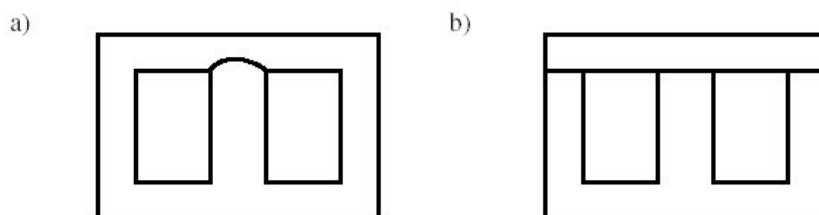
Hlavní výhodou tohoto typu transformátoru je jeho chlazení (zejména vzduchem). Oproti plášťovým transformátorům jsou sice lehčí, ale mají větší rozptyl toků. Od plášťových se také liší svým průřezem, jelikož je všude stejný. Aby se snížil rozptyl toků, vinutí se rozděluje na dva samostatné sloupky. [6], [11]



Obrázek 1.1 Jádrový (vlevo) a plášťový (vpravo) typ transformátoru (převzato z [2])

Plášťové transformátory

Jedná se většinou o jednofázové transformátory. Skládá se ze tří sloupků (střední a dva postranní), přičemž střední sloupek o největším průřezu má na sobě umístěno vinutí a je na něm dvakrát tak velký magnetický tok, jako na postranních. Postranním sloupkům tato skutečnost dovoluje mít poloviční průřez. K výrobě tohoto typu transformátoru se používají typy plechů M a EI (obr. 1.2). [4], [11]



Obrázek 1.2 Typy plechů pro plášťový transformátor: a) tvar M, b) tvar EI (převzato z [11])

Toroidní transformátory

Tento typ transformátoru se využívá uvnitř elektronických zařízení. Toroidní typ má vývody na jedné straně a vyznačuje se vysokou účinností, nízkým rozptylovým tokem, snadnou montáží a nízkým proudem na prázdko. [12]

1.2.3 Dle způsobu chlazení

- Vzduchem chlazené
- Olejem chlazené [1], [4]

Typy transformátorů, u kterých se tyto druhy používají jsou zmíněny v kapitole 1.1.4.

1.2.4 Dle počtu vinutí

- Dvojvinutové – primár, sekundár
- Trojvinutové – primár, sekundár, terciár
- Vícevinutové [11]

Dále se transformátory dělí podle jejich použití:

5. Energetické
6. Přístrojové
7. Galvanické
8. Autotransformátory

9. Svařovací
10. Pecové
11. Měníče frekvence, počtu fází a další

Energetické transformátory

Pod energetické transformátory spadají například izolační, průmyslové distribuční nebo blokové transformátory. [9]

Přístrojové transformátory

Tento typ transformátoru je určen pro napájení jisticích a měřících přístrojů. [4]

Galvanické (oddělovací) transformátory

Obvod s tímto typem transformátoru není spojen vodičem, ale díky transformátorové vazbě u galvanických transformátorů dochází k přenosu elektrické energie. Poměr převodu u tohoto typu je 1:1. Principem oddělovacího transformátoru je oddělení síťového napětí (230 V), které je proti zemi nebezpečné.

Využívá se v místech, kde je potřeba galvanické oddělení obvodu, například v izolovaných sítích jako jsou ve zdravotnictví. [13]

Autotransformátory

Tyto typy transformátorů se díky svým mechanickým vlastnostem využívají jako děliče napětí pro řízení napětí nebo také při spouštění asynchronních motorů.

Dělí se na:

- Zvyšovací
- Snižovací
- Řiditelné [5]

Svařovací transformátory

Tyto jednofázové transformátory se využívají k obloukovému svařování.

Pecové transformátory

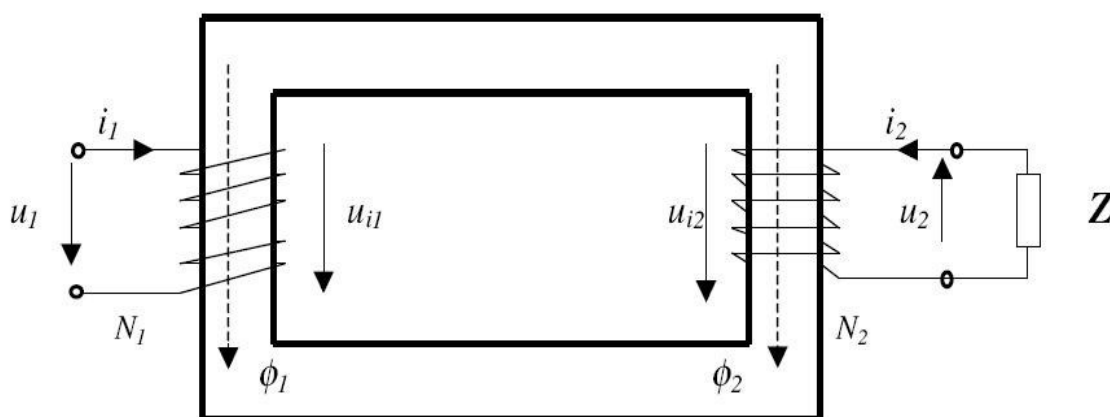
Účel tohoto typu spočívá v napájení pecí typu obloukové elektrické pece.

Měniče frekvence, počtu fází

Využívají se pro změnu kmitočtu střídavého proudu či změnu počtu fází. [4]

1.3 Princip činnosti transformátorů

Transformátor jakožto elektromagnetický stroj, pracuje na principu elektromagnetické indukce. Vstupní napětí U_1 je připojeno na primárním vinutí N_1 . V tomto stavu bude vstupním vinutím protékat proud I_1 , díky němuž je vyvolán magnetický tok Φ se stejnou frekvencí, jako má vstupní napětí. Dále je veden magnetický tok z primárního vinutí do sekundárního přes magnetický obvod. Jelikož se jedná o proměnný magnetický tok, v sekundárním vinutí se také indukuje napětí a při připojení zátěže na sekundární stranu začne protékat proud. [1], [2]



Obrázek 1.3 Elektromagnetické schéma (převzato z [1])

$u_{1,2}$...připojené napětí/napětí na zátěži

$i_{1,2}$...proud na primárním/sekundárním vinutí

$N_{1,2}$...primární/sekundární vinutí

$\Phi_{1,2}$...magnetický tok vyvolaný primárním/sekundárním vinutím

u_{i1}, u_{i2} ...celkové napětí indukované na závitěch primárního/sekundárního vinutí

Z ...zátěž

1.4 Poruchy a ochrany transformátorů

Tak jako na každém zařízení i na transformátoru může nastat porucha, proto jsou připojeny i ochranné zařízení transformátoru, která dokážou včas signalizovat či vypnout stroj v případě průchozí nebo vnitřní poruchy.

1.4.1 Poruchy transformátorů

Poruchy transformátorů se rozdělují do dvou skupin:

1. Průchozí poruchy – jejich příčinou jsou zařízení, která jsou v síti připojena.
2. Vnitřní poruchy – poruchy, které vznikají přímo na transformátoru.

Průchozí poruchy

Mívají dlouhodobější charakter a vyznačují se zvýšenou teplotou, lze je rozdělit na dva druhy:

- Přepětí
- Zkrat na připojeném zařízení

Vnitřní poruchy

- Náhle se vyskytující – zkraty vinutí či zkraty ve svorkách. Tyto poruchy dokážou zachytit rozdílové i nádobové ochrany, a také plynové relé.
- Postupně se vyskytující – poruchy chlazení, špatná izolace plechů či nedokonalé galvanické styky). Tuto poruchu dokáže zachytit pouze plynové relé, a to v počáteční fázi poruchy. [16]

1.4.2 Ochrany transformátorů

Tyto zařízení zajišťují kontrolu spolehlivosti a provozní bezpečnosti na strojích, jako je například transformátor, alternátor a další. Ochrany zajišťují kontrolu nad zařízením ve smyslu rozlišení mezi normálního provozu a poruchového stavu. Ochrana funguje ve dvou stavech, prvním je případ, kdy ochrana současně vypne přístroj a informuje obsluhu o stavu poruchy. Druhým případem pak může být stav, kdy zařízení pouze informuje obsluhu o stavu poruchy a ta dále rozhodne, zda je potřeba přístroj vypnout. [15], [16]

Plynové relé

Tento typ ochrany se využívá u přístrojů chlazených olejem. Ohřev oleje, způsobený například ohřátím vodiče, uvolňuje z oleje plyny, jako jsou oxid uhličitý, dusík nebo vodík. Plynové relé tyto plyny detekuje a dokáže v případě rychlého vývinu přístroj vypnout. [14], [16]

Nádobová ochrana

Tato ochrana působí v případě, kdy zemní proud prochází kostrou přístroje či jiných zkratech. Vypnutí přístroje zajišťuje proudová ochrana. [14], [16]

Rozdílová ochrana

Měřením a následným výpočtem se zajišťuje ochrana odpojení transformátoru. Tento stav nastává v době, kdy na vstupu či výstupu přístroje nastane porucha. Zařízení změří proud na koncích přístroje a díky rozdílu fázorů proudu porovná nastavenou hranici s touto hodnotou. Pokud je rozdíl větší než stanovený proud, ochrana odpojí obě strany transformátoru. [1], [16]

1.5 Izolační transformátor

Pro napájení zdravotnických prostor (IT sítě) se často používá ochranný oddělovací transformátor. Zejména se využívá jednofázového provedení. Bezpečnostní transformátory mají zesílenou izolaci, což zajišťuje, že v případě poruchy nemůže dojít k elektrickému spojení vstupního a výstupního vinutí. Díky jejich konstrukci je lze umísťovat horizontálně i vertikálně. Takový druh transformátoru splňuje požadavky pro napájení zdravotnických prostor skupiny 2.

Transformátor má galvanický oddělená primární a sekundární vinutí. Mezi těmito vinutími se nachází statické stínění. Díky pryskyřicové impregnaci jsou chráněny proti korozi. Jmenovitý výkon takového transformátoru musí být minimálně 3,15 kVA a menší než 8 kVA. Ochrana proti přetížení není ve zdravotnickém prostředí povolena, stejně tak není povolena ochrana proti nadměrnému oteplení. Tyto dvě veličiny se smí pouze monitorovat. V primárním vinutí může být připojena pouze ochrana proti zkratu. V sekundárním vinutí se připojuje hlídač izolačního stavu. [21]

1.6 Sítě a normy ve zdravotnictví

Ve zdravotnictví je důležité postupovat z hlediska bezpečnosti dle platných předpisů a norem. V tomto prostředí se z důvodu bezpečnosti pacienta a obsluhy a zajištění kontinuity napájení používá zejména síť IT. Jedná se převážně o zdravotnické prostory skupiny 2 určené pro napájení elektrických přístrojů a systémů, starající se o podporu životních funkcí pacienta, samotné zdravotnické přístroje a další přístroje, umístěné v patientském prostředí. Výhodou sítě IT oproti síti TN je její lepší požární bezpečnost či vyšší bezpečnost při nižším poruchovém proudu, a to díky velké impedanci mezi sítí a zemí. Použití sítě TN-C není dovoleno. V případech,

kdy dojde k omezení například z důvodu poškození požárem či ochran osvětlení může být použita síť TN-S. Proudový chránič se v takovém případě smí použít pouze u vybraných zdravotnických přístrojů jako jsou rentgeny, přístroje nepodporující životní funkce nebo operační stoly. [21]

Zdravotnické prostory se dělí do tří skupin:

- Skupina 1 – V tomto prostoru se předpokládá, že porucha zdroje nezpůsobí ohrožení pacienta či obsluhy. Také je vyloučené použití příložných částí.
- Skupina 1 – Zdravotnický prostor, kde při přerušení základního napájení je možné přerušení provozu zdravotnických elektrických přístrojů, aniž by došlo k ohrožení pacienta. Vyšetření nebo ošetření pacientů lze přerušit nebo opakovat. Předpokládá se použití příložných částí, a to jak zevně, tak uvnitř těla pacienta, avšak ne na srdci (spadá do skupiny 2).
- Skupina 2 – Zdravotnický prostor, ve kterém se předpokládá, že přerušení napájení může ohrozit život pacientů nebo jejich vyšetření. Tyto ošetření není možné opakovat. Předpokládá se zde intra kardiální použití příložných částí (operační sály, JIP).

1.6.1 Síť IT

Jedná se o elektrickou rozvodnou síť, ve které musí být všechny živé části izolovány od země nebo se zemí spojeny v jednom bodě přes dostatečně velkou impedanci. Neživé části jsou v této síti spojeny pomocí ochranného uzemnění přímo se zemí, a to buď jednotlivě nebo po skupinkách. Pro neživé části však platí podmínky, kdy součet odporů uzemnění (R_a) v násobku s poruchovým proudem při první poruše (I_d) musí být menší než 50 V (ve střídavých sítích) a menší než 120 V (ve stejnosměrných sítích).

$$R_a * I_d \leq 50 V \quad R_a * I_d \leq 120 V \quad (1.1)$$

Výhodou a důležitou vlastností sítě je, že v případě, kdy dojde k první poruše na elektrickém zařízení, ochrana automatického odpojení od zdroje ještě nereaguje a provoz zařízení může běžet dále. Tento stav je velmi žádoucí například ve výrobních průmyslech nebo ve zdravotnictví. Ochrana v této síti se od roku 2018 do současnosti řídí dle normy ČSN 33 2000-4-41 ed. 3 a to pomocí hlídače izolačního stavu. Toto zařízení má za úkol detekovat první poruchu a signalizovat ji pro obsluhu, která poruchu následně co nejdříve odstraní. Pokud k odstranění první poruchy nedojde a nastane porucha druhá, nastane stejně jako v síti TN-S automatické odpojení od zdroje neboli od sítě. Dále se v této síti využívají různé druhy přístrojů pro monitorování, hlídání a ochranu:

- Zmíněné hlídače izolačního stavu (IMD)

- Proudové chrániče
- Nadproudové ochranné přístroje
- Přístroje pro monitorování reziduálního proudu
- Systémy pro vyhledávání izolačních poruch

Dle normy ČSN EN 61558-2-15 také:

- Systémy monitorování maximálního možného příkonu (zatížení) transformátoru (zdroje) IT
- Systémy monitorování teploty transformátoru (zdroje) IT [20]

1.7 Unikající proudy

Unikající proud obsahuje dvě složky, první je proud konstrukční, který uniká do země a neživých částí v normálních podmínkách. Druhou složkou je poruchový proud, který uniká v případě poruchy. Projevuje se dvěma stavy, podle jejich působení. U spotřebičů s třídou ochrany I (základní izolace jako základní ochrana a ochranné pospojování jako ochrana při poruše) je to proud, unikající ochranným vodičem. U spotřebičů s třídou ochrany II (také základní izolace, a navíc přídavná nebo zesílená izolace) je to dotykový proud, protékající přes obsluhu nebo pacienta do země.

Principem unikajícího proudu je odvedení proudu přes izolovanou část spotřebiče do dalších částí spojených s vodičem PE (ochranným vodičem).

U spotřebičů třídy ochrany I se měří proud tekoucí ochranným vodičem PE, kdy tento proud nesmí být vyšší než zavedená maximální hodnota 3,5 mA. U spotřebičů třídy ochrany II se měří dotykový proud vodivými částmi přístroje, kdy proud nesmí být vyšší než maximální hodnota 0,5 mA. [18]

2 Studium metod měření unikajících proudů

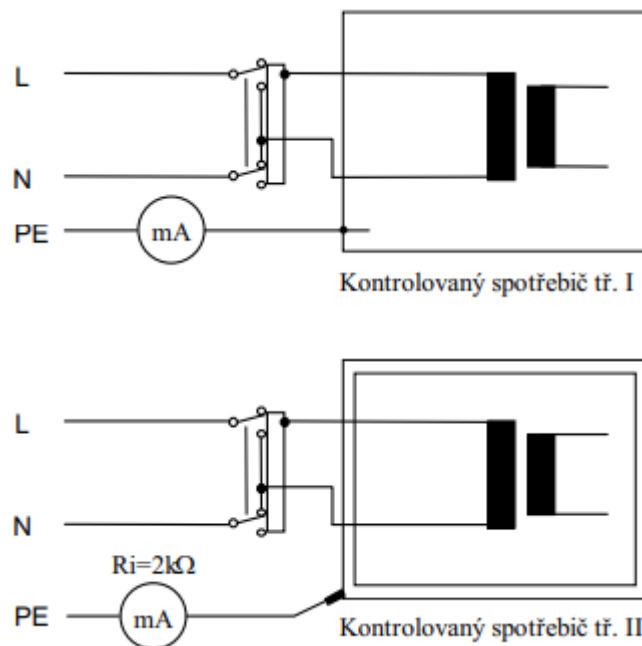
Měření unikajících proudů je jedním z několika druhů revizí a zkoušek, které jsou dle příslušné normy ČSN 33 2000-6 ed. 2 povinné pro elektrická zařízení. Metody pro měření unikajících proudů zdravotnického přístroje nebo jeho příložené části se rozdělují dle druhu zdravotnického prostředku a to na 3 druhy. První je metoda přímá, druhá nepřímá (alternativní) a poslední rozdílová (diferenciální) metoda.

Měření unikajících proudů na zdravotnickém prostředku se provádí třemi způsoby, a to mezi síťovou a přístupnou částí, dále mezi síťovou a příložnou částí (určená k diagnostice či výkonu na pacientovi) a mezi přístupnou a příložnou částí. Existují však typy, kdy se nemusí provádět měření mezi přístupnou a příložnou částí, a to v případě, kdy je příložná část zdravotnického prostředku spojena s jejím krytem a je tedy zahrnuta do měření unikajícího proudu krytem. [17]

U všech zmíněných metod je záměrně zvolen odpor o 2 k Ω , a to z důvodu, že tento odpor představuje velikost odporu lidského těla.

2.1 Přímá metoda měření unikajících proudů

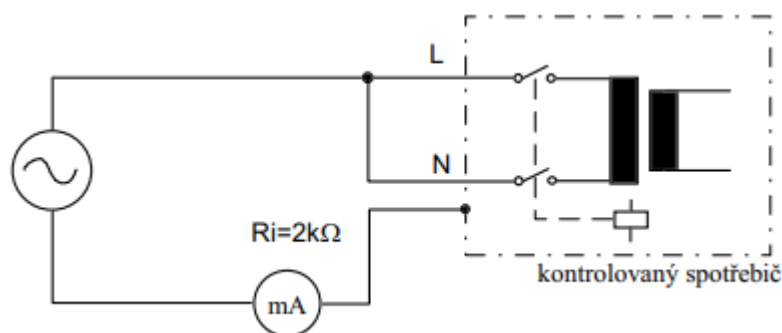
Tato metoda patří k nejpřesnějším metodám, a to z důvodu měření unikajícího proudu za normálního provozu. V takovém stavu se měří již zmíněný proud unikající přes ochranný vodič do země nebo dotkový proud tekoucí vodivými částmi krytu. Měřený zdravotnický prostředek, který je objektem měření, však musí být v době měření svým uložením izolován od země, aby se zamezilo odchylky náhodného uzemnění. Za výhody této metody lze považovat její vysoká přesnost při měření malých unikajících proudů. Metoda se nejvíce ze všech zmíněných přibližuje reálné hodnotě unikajících proudů. [17], [19]



Obrázek 2.1 Schéma měření přímou metodou (převzato z [19])

2.2 Nepřímá (alternativní) metoda měření unikajících proudů

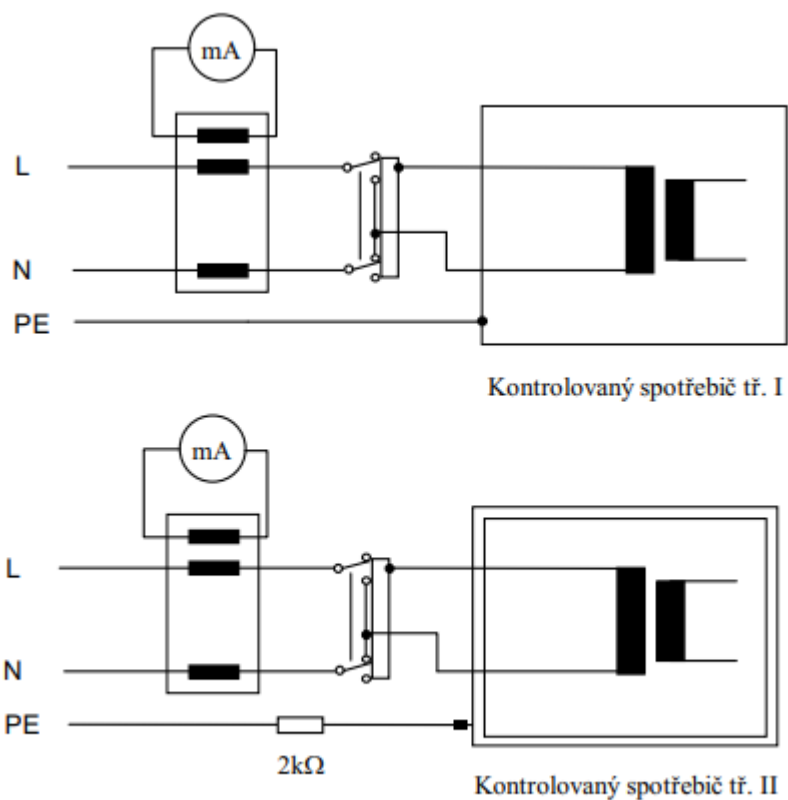
Jak je již z názvu patrné, měření probíhá nepřímou. Na rozdíl od metody přímé se neměří za normálního provozu, ale využívá se pomocného zdroje o střídavém napětí 230 V / 50 Hz. S pomocí tohoto zdroje se následně na odporu o 2 kΩ, fungujícího jako simulace odporu lidského těla, měří unikající proudy způsobem vzájemného zkratování pracovních vodičů a jejich připojením k pomocnému zdroji. Výhodou této metody je její snadná opakovatelnost, a to i z toho důvodu, že je měřený přístroj a síť galvanicky oddělená. Tuto metodu není možné použít pro měření na přístrojích s aktivními obvody (spínané zdroje nebo relé). [17], [19]



Obrázek 2.2 Schéma měření nepřímou metodou (převzato z [19])

2.3 Rozdílová (diferenciální) metoda měření unikajících proudů

Pomocí této metody se za běžného provozu přístroje měří součet okamžitých hodnot proudů v pracovních vodičích, a to i u spotřebičů libovolně uzemněných. Metoda se nazývá diferenciální z důvodu použití diferenciálního transformátoru k získání součtu proudů. Tato metoda je obdobná metodě měření tzv. reziduálního proudu u proudových chráničů. Rozdíl mezi pracovními vodiči je možné měřit díky skutečnosti, že unikající proudy zpět diferenciálním transformátorem netečou. Výhodou této metody je možnost měření na přístroji, který není izolován. Spojení neživých částí se zemí zajišťuje měřicí přístroj. I zde je však nutností opakování měření při obou polaritách, jako je tomu i při metodě přímé, a to z důvodu možného připojení do zásuvky, která obsahuje opačně připojené napájecí vodiče. Měřený přístroj může být připojen přímo k síti bez nutnosti použití oddělovacího transformátoru. Kvůli své nižší přesnosti při měření malých unikajících proudů však není k tomuto účelu příliš vhodná. [17], [19]



Obrázek 2.3 Schéma měření rozdílovou metodou (převzato z [19])

3 Výběr metod měření unikajícího proudu

Tato kapitola pojednává o výběru metod pro měření unikajících proudů. Konečné schéma zapojení bude upraveno pro měření na transformátorech.

3.1 Přímá metoda

První metoda je pro měření vhodná díky své přesnosti a předurčenosti pro měření malých unikajících proudů. Studentům může při měření nejlépe nastínit reálné hodnoty konkrétního měření. Je nezbytné dodržet izolované uložení měřeného spotřebiče. S touto metodou se tedy bude dále pracovat.

3.2 Nepřímá metoda

Tato metoda je díky své reprodukovatelnosti také vhodná. Při této metodě se však počítá s větším unikajícím proudem, vlivem připojení napájecího zdroje.

3.3 Rozdílová metoda

I přes své klady se tato metoda pro měření unikajících proudů na izolačním transformátoru nehodí, a to z důvodu nízké přesnosti na požadovaných malých proudech. Tato metoda také nezohledňuje ztráty v mědi (tepelné ztráty) a ztráty v železe (ztráty vířivými proudy). S touto metodou se tedy dále pracovat nebude.

4 Návrh koncepce laboratorní úlohy s izolačním transformátorem pro biomedicínské účely

V této kapitole je popsán výběr členů potřebných pro měření a návrh koncepce laboratorní úlohy. Každému z výše uvedeného se věnuje vlastní podkapitola.

4.1 Návrh a výběr členů

V následující části je rozepsán návrh a postup výběru členů potřebných pro měření.

4.1.1 Zdroj signálu

V případě využití síťového napětí by bylo z důvodu bezpečnosti studentů nezbytné konstrukci transformátoru zcela uzavřít do plastového krytu, kdy přístupné zůstanou pouze vývody pro měření. Na tuto skutečnost by museli být studenti upozorněni a mohlo by při neuposlechnutí studentem dojít k úrazu elektrickým proudem. Proto bude v laboratorním měření pro napájení transformátoru použit generátor osciloskopu, jehož generovaný sinusový signál bude zesílen zesilovačem. Transformátor tak bude napájen napětím v jednotkách voltů.

Pro konečné přepočty, kvůli možnosti srovnání naměřených a maximálních, normou daných, hodnot unikajících proudů, bude použita vypočtená hodnota konstanty K_S , která dovolí přepočet hodnot zpět do hodnoty síťového napětí. U_z je efektivní hodnota napětí zdroje. U_m je naměřené napětí a U_{mp} je přepočtená hodnota napětí vůči hodnotě napětí síťovému.

$$K_S = \frac{230}{U_z} = [-] \Rightarrow U_{mp} = K_S * U_m = [V] \quad (4.1)$$

4.1.2 Zesilovač signálu

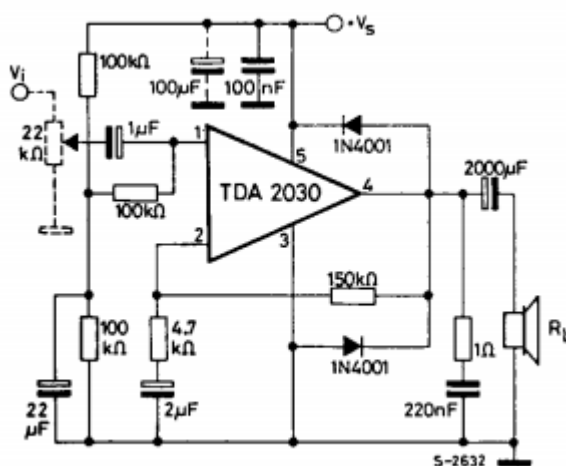
Z důvodu použití tak nízkého napájecího napětí transformátoru je potřebné generovaný signál před připojením k transformátoru nejprve zesílit, tím bude následně dosaženo vybuzení transformátoru a požadované měřitelné hodnoty unikajícího proudu. K tomu bude sloužit jednokanálový nízkofrekvenční zesilovač, který je sestaven pomocí stavebnice a doplněn o izolační podložku a chladič, pro jeho pasivní chlazení. Tento zesilovač se skládá z integrovaného obvodu TDA2030 s výkonem 20 W. Využitý zesilovač je zapouzdřen v pouzdře Pentawat TO220. Zapojení zesilovače se řídí doporučeným zapojením výrobce, volně dostupném v datovém listě tohoto integrovaného obvodu.

V následující tabulce je výčet dvoukanálových zesilovačů TDA s katalogovými údaji:

Tabulka 4.1 Katalogové údaje obvodů TDA (převzato z [24])

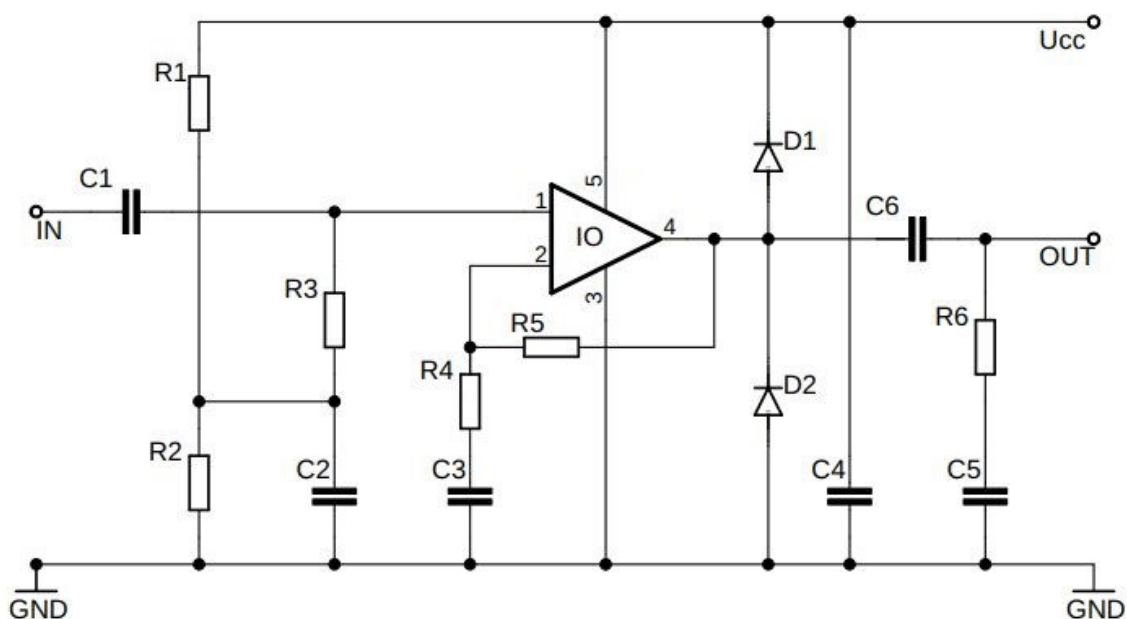
Obvod TDA...	2030	2040	2050	2051	2030A
Výstupní výkon	14W	22W	30W	40W	18W
Hudební výkon	20W	30W	50W	60W	25W
Napájecí napětí MIN/MAX (V)	6/24	8/26	8/36	8/42	8/28
Klidový proud (mA)	40	45	55	65	45
Výstupní proud (A)	3,5	4	5,5	6,5	4

Doporučené zapojení dostupné z datasheetu výrobce STMicroelectronics zesilovače TDA2030 je znázorněno v následujícím schématu.



Obrázek 4.1 Doporučené zapojení obvodu TDA2030 (převzato z [25])

V programu EAGLE bylo doporučené zapojení překresleno s označením vlastních součástek.



Obrázek 4.2 Zapojení obvodu TDA2030

Následující tabulka popisuje hodnoty a typ součástek, použitých na zesilovači.

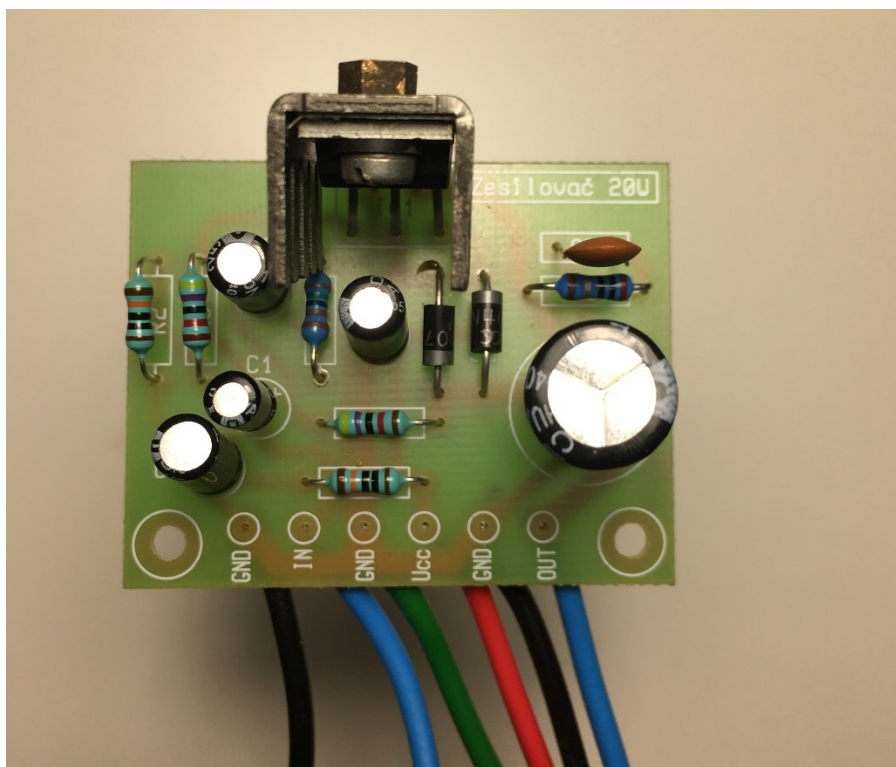
Tabulka 4.2 Rozpis součástek, použitých na zesilovači TDA2030

Označení	Hodnota
$R_{1,2}$	100 k Ω
$R_{3,5}$	47 k Ω
R_4	1,5 k Ω
R_6	1 Ω
C_1	1 μ F
$C_{2,3,4}$	22 μ F
C_5	100 nF
C_6	1000 μ F
$D_{1,2}$	IN4007
IO	TDA2030

Vybraný integrovaný obvod je napájen nesymetricky napětím v rozmezí 12 až 32 V stejnosměrných. Deska plošného spoje má rozměry 5 x 4 cm. Maximální odběrový proud při plném výkonu je 0,7 A. Hodnota výkonu zesilovače je 20 W při 4 Ω . Vstupní citlivost, daná výrobcem, je 270 mV pro plné vybuzení. Díky odporům $R_{1,2,3}$, které do vstupního signálu připojují napětí stejnosměrné, rovnající se polovině napětí napájecího, je možné použít asymetrické

napětí. Kondenzátor C_2 slouží pro lepší filtraci napětí. Kondenzátor C_6 a odpor R_6 slouží jako Boucherotův člen, zabráňující rozkmitání zesilovače. Napětové zesílení se určuje vztahem

$$A_U = \left(\frac{R_5}{R_4}\right) + 1 = \left(\frac{47000}{1500}\right) + 1 = 32,3 [-] \quad (4.2)$$



Obrázek 4.3 Sestavený audio zesilovač TDA2030 v bodě 4.1.2

Zesilovač byl otestován při napájení zesilovače 24 V stejnosměrných, na jeho vstup byl přiveden sinusový signál o frekvenci 1 kHz a napětí U_{p-p} 650 mV. Pro přepočítání hodnoty U_{p-p} na efektivní hodnotu střídavého napětí je nejprve potřeba vypočítat amplitudu změřeného napětí U_M .

$$U_M = \frac{U_{p-p}}{2} = 325 [mV] \quad (4.3)$$

A následně již efektivní hodnotu střídavého napětí U .

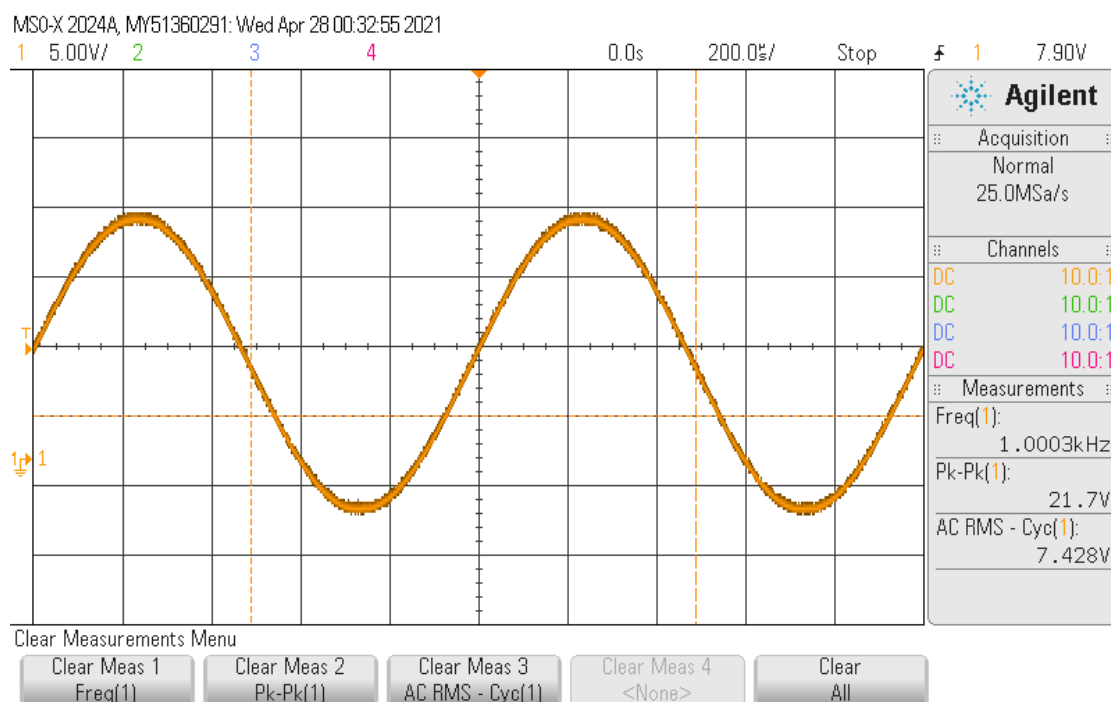
$$U = \frac{U_M}{\sqrt{2}} = 230 [mV] \quad (4.4)$$

Po přepočtu na efektivní napětí U je generované napětí 230 mV.

Výstup zesilovače byl připojen k osciloskopu, kde byl zaznamenán výstupní signál o frekvenci 1 kHz, napětí U_{p-p} 21,7 V a efektivní napětí U 7,428 V.

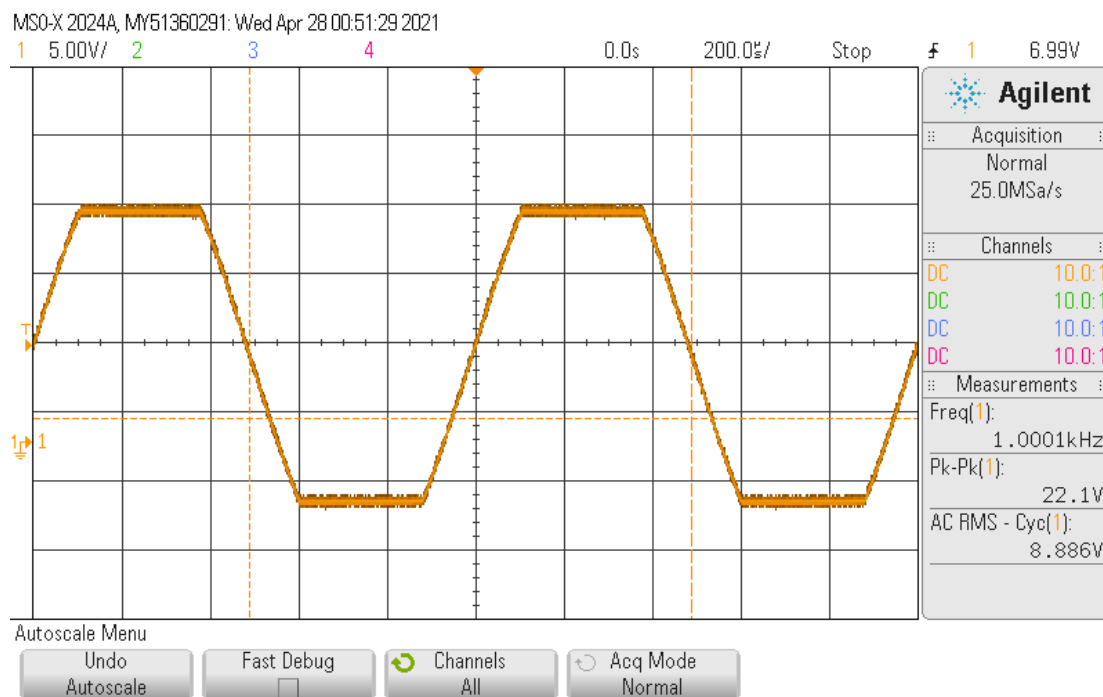
Dále se v práci bude pracovat již s efektivním napětím, a to z důvodu přepočtu pomocí konstanty K_S na hodnoty síťového napětí, jak je uvedeno v kapitole 4.1.1. Podle vzorce 4.1 již lze snadno vypočítat konstantu K_S . U_z je v tomto smyslu výstupním napětím zesilovače.

$$K_S = \frac{230}{U_z} = \frac{230}{7,428} = 30,96 [-] \quad (4.5)$$



Obrázek 4.4 Test zapojení zesilovače TDA 2030 o frekvenci 1 kHz a generovaném napětí U 230 mV v bodě 4.1.2

Vstupní napětí signálu U o hodnotě 230 mV bylo maximální napětí, které zesilovač zvládl zesílit, při vyšší hodnotě 353 mV již napětí přestalo stoupat a signál se na výstupu začal deformovat.



Obrázek 4.5 Test zapojení zesilovače TDA 2030 o frekvenci 1 kHz a generovaném napětí U 353 mV v bodě 4.1.2

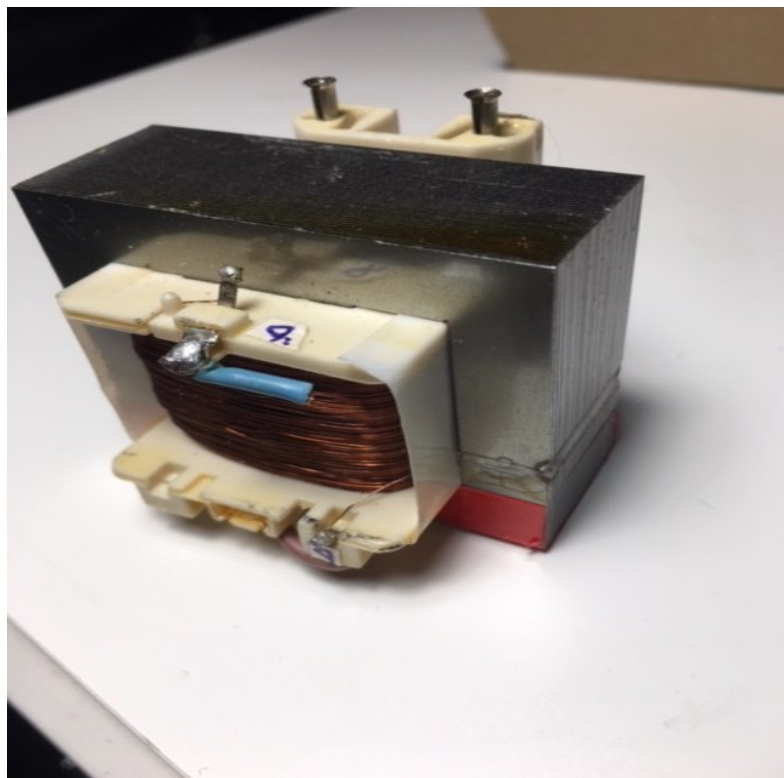
4.1.3 Výběr transformátorů

Transformátory budou 3 pro možnost porovnání měření na každém z nich a vyhodnocení rozdílu výsledků.

Transformátory budou vybrány s jmenovitým výkonem maximálně okolo 100 VA. S tímto výkonem totiž souvisí i menší jmenovitý proud transformátoru a zejména jeho hmotnost.

Pro demonstraci vadného transformátoru se sníženou izolací bude sestavena simulace v programu falstad.

První popisovaný transformátor označený transformátor 1 je síťový transformátor ze skládaných plechů a jádrem EI.



Obrázek 4.6 Vybraný transformátor 1

Na prvním transformátoru se 2 vinutími byl orientačně změřen průřez jádra S $3,78 \text{ cm}^2$, dále byl ze vztahu vypočítán příkon transformátoru. [25]

$$S = \sqrt{P_{in}} \Rightarrow P_{in} = 3,78^2 = 14,29 \text{ VA} \quad (4.6)$$

Z něj pak výkon, účinnost 0,8 byla zvolena z tabulky 4.3.

$$P_{in} = \frac{P}{0,8} \Rightarrow P = P_{in} * 0,8 = 11,4 \text{ W} \quad (4.7)$$

Dále počet závitů na jeden volt, pro měření na frekvenci 50 Hz lze vztah zapsat takto.

$$N_{1V} = \frac{45}{S} = \frac{45}{3,78} = 11,9 \frac{\text{závitů}}{1V} \quad (4.8)$$

Následně se vypočte počet závitů na primární a sekundární straně pro koeficient $k_{1,2}$ dle tabulky 4.3.

Na primární straně bylo změřeno napětí 230 V na sekundární straně pak 20,45 V.

$$N_1 = N_{1V} * U_1 * k_1 = 11,9 * 230 * 0,93 = 2545 \text{ závitů} \quad (4.9)$$

$$N_2 = N_{1V} * U_2 * k_2 = 11,9 * 20,45 * 1,08 = 263 \text{ závitů} \quad (4.10)$$

Tabulka 4.3 Určení účinnosti a korekce ztrát pro výkon transformátoru

Výkon [VA]	Účinnost [%]	k ₁	k ₂
5 až 20	80	0,93	1,08
20 až 75	85	0,95	1,05
75 až 200	88	0,96	1,04

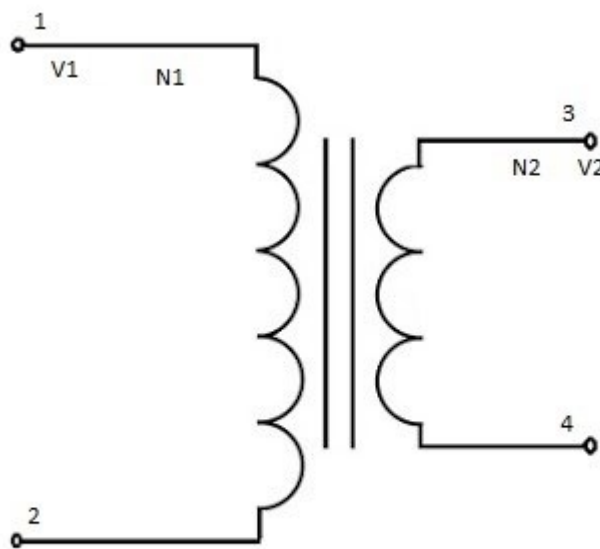
Transformační poměr tohoto transformátoru se vypočte podle

$$p = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{263}{2545} = 0,1 [-] \quad (4.11)$$

Jedná se tedy o transformaci dolů, napětí na výstupu je proto nižší.

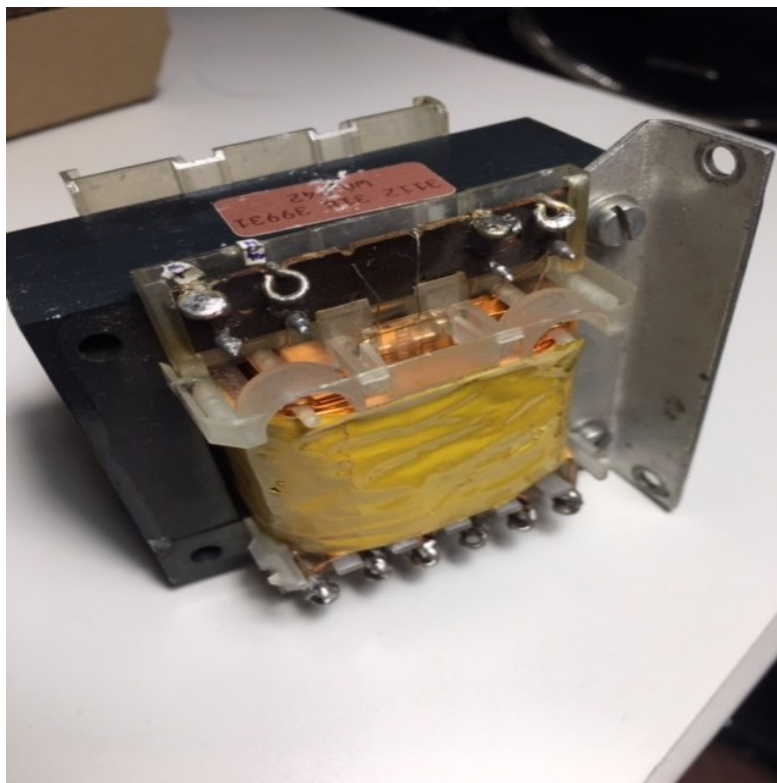
Na následujícím obrázku je vyobrazeno schéma ilustrující počet vinutí transformátoru.

V₁₋₂ slouží k popisu počtu vinutí. Kontakty 1, 2, 3 a 4 označují svorky, na kterých jsou primární a sekundární vinutí připojena. Označení N₁ a N₂ popisují primární a sekundární strany. Mezi vývody primárního vinutí byl naměřen odpor 62,1 Ω, na sekundární straně 0,2 Ω.



Obrázek 4.7 Schéma rozložení vinutí transformátoru 1

Druhý popisovaný transformátor označený WA 942 je také síťový, ze skládaných plechů s EI jádrem. Tento má navíc vinutí oddělené mezerou.

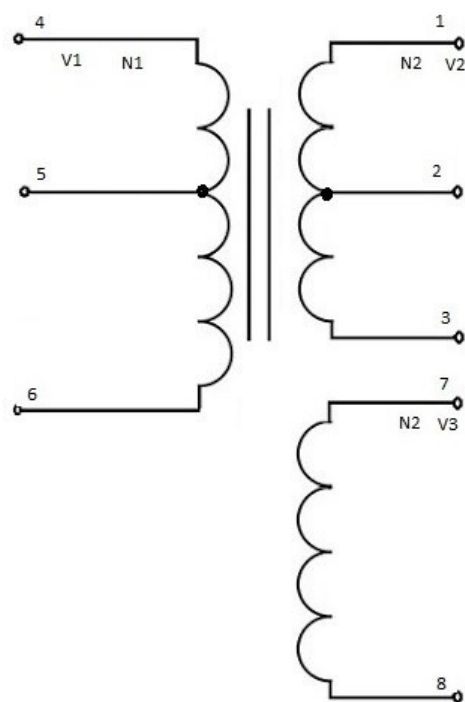


Obrázek 4.8 Vybraný transformátor WA 942

Podle vzorců 4.2 až 4.7 je taktéž možné vypočítat ze změřeného průřezu jádra ($6,5 \text{ cm}^2$) příkon (42 VA), výkon (35,7 W), počet závitů na jeden volt (6,9 závitů/1 V), počet závitů na primární cívce (1507 závitů) a počet závitů na vybrané sekundární cívce (408 závitů). Transformační poměr je 0,24, výstupní napětí je tedy taktéž nižší. Na primární straně bylo změřeno napětí 230 V na sekundární straně pak 56 V.

Na následujícím obrázku je vyobrazeno schéma ilustrující počet vinutí transformátoru.

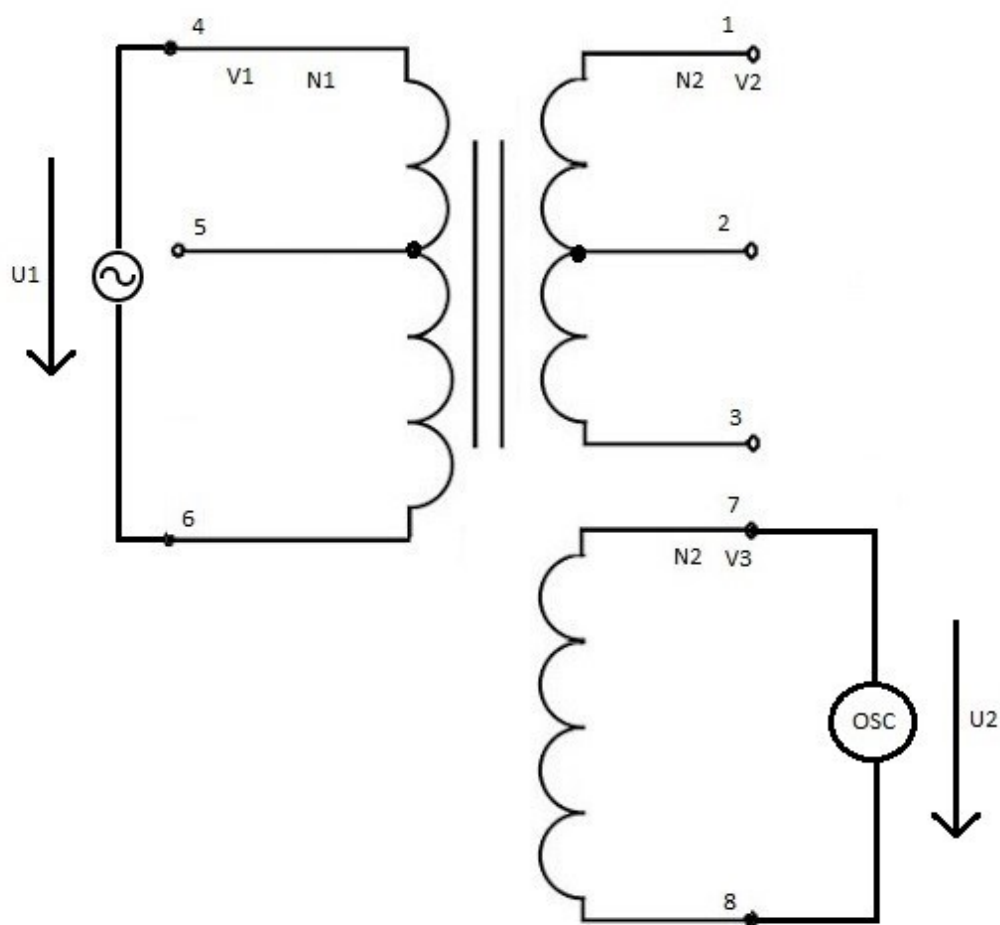
V_{1-3} slouží k popisu počtu vinutí. Kontakty 1 až 8 označují svorky, na kterých jsou primární a sekundární vinutí připojena. Označení N_1 a N_2 popisují primární a sekundární strany. Mezi vývody 4 a 6 primárního vinutí byl naměřen odpor 45Ω , na sekundární straně, na vybraném vinutí, mezi vývody 7 a 8 $0,7 \Omega$.



Obrázek 4.9 Schéma rozložení vinutí transformátoru WA 942

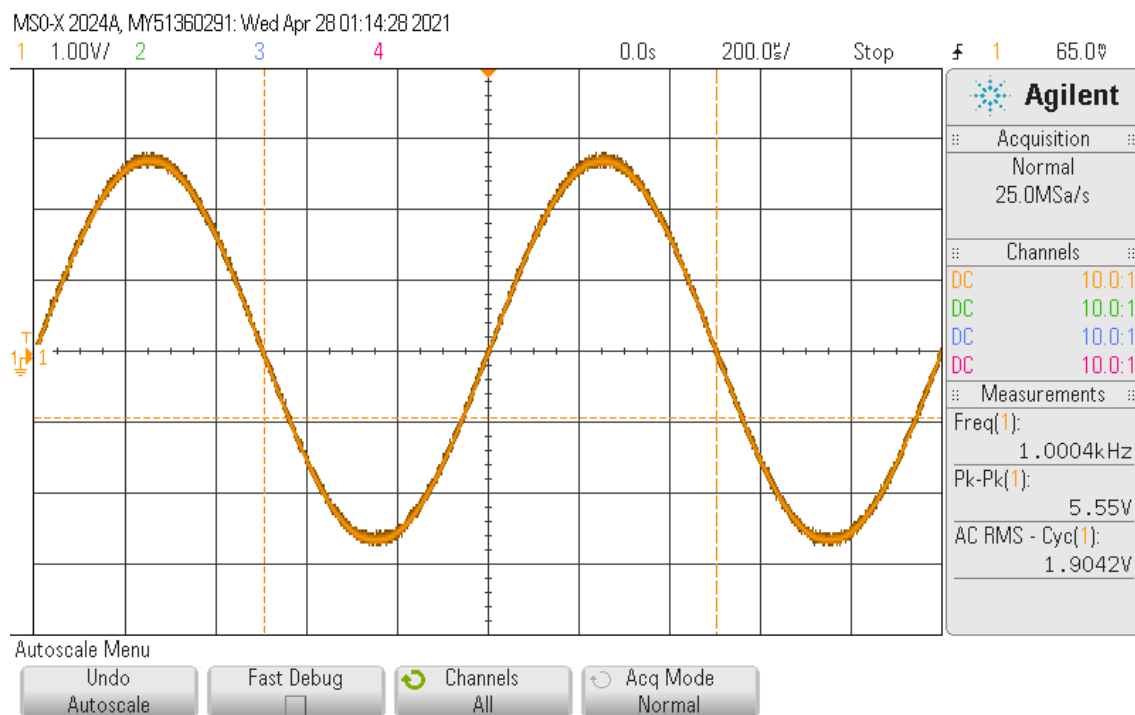
Na tomto transformátoru byl uskutečněn test zapojení s již sestaveným zesilovačem. Na vstup primárního vinutí (4-6) byl připojen vytvořený zdroj, který se skládá ze zesilovače a osciloskopu, na výstup (7-8) byl připojen další osciloskop pro měření výstupního napětí transformátoru.

Na následujícím obrázku je schéma zapojení tohoto testu.



Obrázek 4.10 Schéma zapojení zesilovače s transformátorem WA942

Při frekvenci generovaného signálu 1kHz a 230 mV bylo na vstupu do primárního vinutí napětí U_1 7,402 V a na výstupu transformátoru bylo napětí U_2 1,904 V.



Obrázek 4.11 Test zapojení zesilovače TDA 2030 s transformátorem WA 942 o frekvenci 1 kHz a generovaném napětí U 230 mV v bodě 4.1.3

Třetí popisovaný transformátor označený 9WN je také síťový, ze skládaných plechů s EI jádrem. Tento transformátor se využíval v stereofonních gramofonech Tesla NZC140, NZC142 a AZS179.

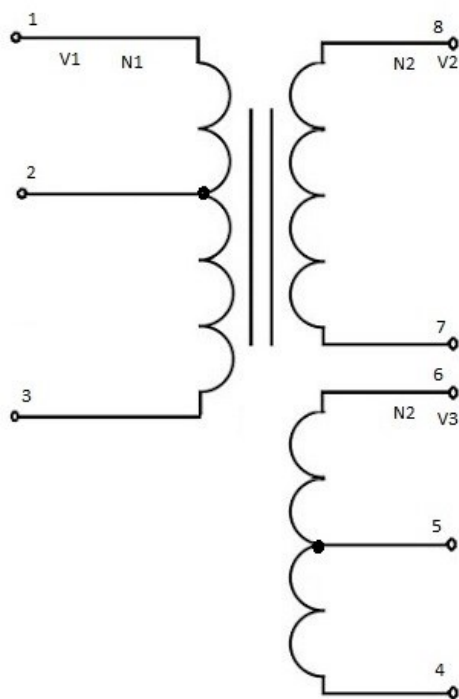


Obrázek 4.12 Vybraný transformátor 9WN

Podle vzorců 4.2 až 4.7 je taktéž možné vypočítat ze změřeného průřezu jádra ($10,5 \text{ cm}^2$) příkon (110 VA), výkon ($93,5 \text{ W}$), počet závitů na jeden volt ($4,2 \text{ závitů/1 V}$), počet závitů na primární cívce (917 závitů) a počet závitů na vybrané sekundární cívce (378 závitů). Transformační poměr je $0,37$, výstupní napětí je tedy taktéž nižší. Na primární straně bylo změřeno napětí 230 V na sekundární straně pak 85 V .

Na následujícím obrázku je vyobrazeno schéma ilustrující počet vinutí transformátoru.

V_{1-3} slouží k popisu počtu vinutí. Kontakty 1 až 8 označují svorky, na kterých jsou primární a sekundární vinutí připojena. Označení N_1 a N_2 popisují primární a sekundární strany. Mezi vývody 1 a 3 primárního vinutí byl naměřen odpor $18,5 \Omega$, na sekundární straně, na vybraném vinutí, mezi vývody 4 a 6 $0,8 \Omega$.



Obrázek 4.13 Schéma rozložení vinutí transformátoru 9 WN

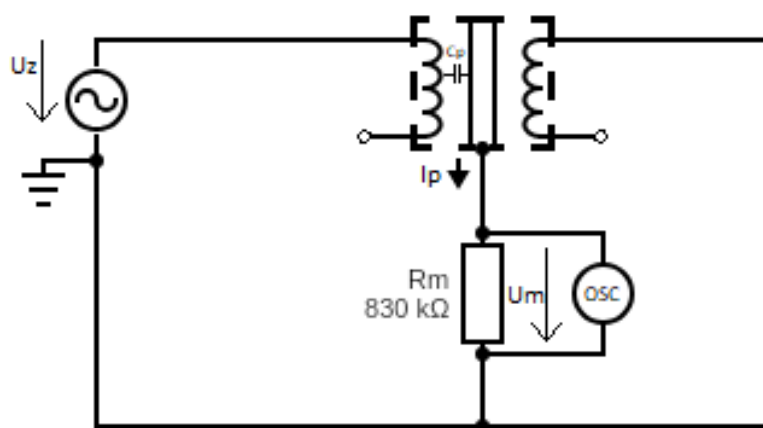
4.2 Návrh měřících metod

V následující části je rozepsán návrh měření unikajících proudů.

4.2.1 Návrh měřícího obvodu pro ověření předpokládaných vlastností

Pro ověření předpokladu, že unikající proudy tečou skrze parazitní kapacity C_p , je dále navrženo schéma zapojení.

Na následujícím obrázku je návrh zapojení pro měření unikajících proudů. Střídavý zdroj o napětí U_z 7,428 V je zde výstup zesilovače. C_p je znázorněna parazitní kapacita mezi vinutími a jádrem. Při zapojení střídavého zdroje k jednomu konci primárního vinutí a jednomu konci sekundárního vinutí, lze měřit unikající proud I_p z kostry transformátoru do uzemnění. Při zvyšující se frekvenci napájecího napětí se vlivem nepřímé úměry zmenší kapacitní reaktance parazitní kapacity, jinými slovy se zmenší odpor, kterým unikající proud bude na kostru transformátoru procházet. Z důvodu očekávaného velmi malého unikajícího proudu (v řádu μA) přes parazitní kapacity byl záměrně zvolen odpor R_m 830 k Ω pro získání měřitelné hodnoty úbytku napětí na tomto odporu. Vycházelo se tedy z předpokladu, že unikající proud tekoucí přes parazitní kapacity na kostru bude mít hodnoty v řádu μA .



Obrázek 4.14 Měřící obvod pro metodu měření unikajících proudů v bodě 4.2.1

I_p ...unikající proud z kostry do uzemnění

R_m ...měřený rezistor

C_p ...parazitní kapacita mezi vinutím a jádrem a mezi oběma vinutími

U_m ...napětí na měřeném rezistoru

U_z ...napětí zdroje

Pozn. Přerušovaná čára značí kostru transformátoru spojenou s jádrem.

Po naměření hodnot U_m při zvyšující se frekvenci je potřeba toto napětí vynásobit dle vzorce 4.1 konstantou K_S , aby odpovídalo měření při síťovém napětí, a to z důvodu pozdějšího vyhodnocení naměřených hodnot. Po vynásobení se tedy pracuje s napětím U_{mp} .

$$U_{mp} = K_S * U_m = [V] \quad (4.12)$$

Samotný unikající proud I_p se vypočte dle Ohmova zákona.

$$I_p = \frac{U_{mp}}{R} [A] \quad (4.13)$$

Pro lepší čitelnost budou hodnoty proudu přepočteny na hodnoty μA .

Tabulka 4.4 Tabulka pro měření unikajícího proudu v bodě 4.2.1

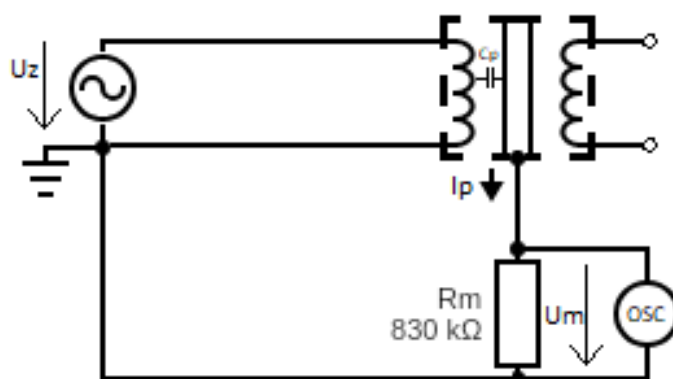
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
0,3			
0,5			
0,8			
1			
2			
3			
5			
7			
9			
11			
13			
15			
18			

Z takto vypočtených hodnot se následně vynese graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci. Unikající proud by se měl s rostoucí frekvencí zvětšovat, jak bylo popsáno na začátku tohoto bodu.

V následujících metodách měření unikajícího proudu bude vycházeno z tohoto měření.

4.2.2 Měření unikajících proudů přímou metodou

Upravené schéma zapojení pro měření přímou metodou na transformátorech je na následujícím obrázku.



Obrázek 4.15 Schéma zapojení pro přímou metodu v bodě 4.2.2

I_p ...unikající proud z kostry do uzemnění

R_m ...měřený rezistor

C_p ...parazitní kapacita mezi vinutím a jádrem a mezi oběma vinutími

U_m ...napětí na měřeném rezistoru

U_z ...napětí zdroje

Pozn. Přerušovaná čára značí kostru transformátoru spojenou s jádrem.

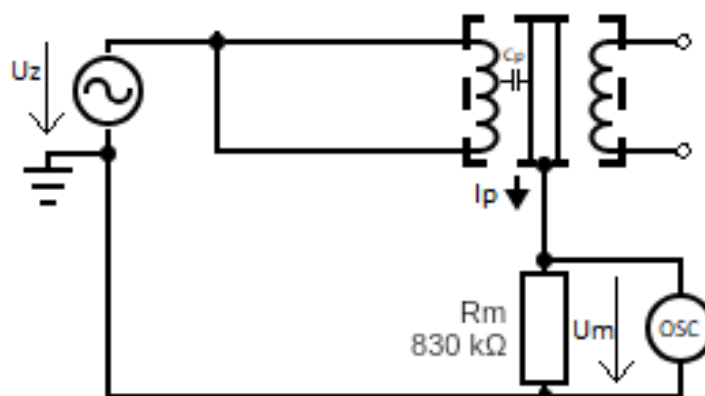
Měření bude probíhat pro frekvence od 1 do 9 kHz.

Tabulka 4.5 Tabulka pro měření unikajícího proudu přímou metodou v bodě 4.2.2

Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1			
2			
3			
5			
7			
9			

4.2.3 Měření unikajících proudů nepřímou metodou

Upravené schéma zapojení pro měření nepřímou metodou na transformátorech je na následujícím obrázku.



Obrázek 4.16 Schéma zapojení pro nepřímou metodu v bodě 4.2.3

I_p ...unikající proud z kostry do uzemnění

R_m ...měřený rezistor

C_p ...parazitní kapacita mezi vinutím a jádrem a mezi oběma vinutími

U_m ...napětí na měřeném rezistoru

U_z ...napětí zdroje

Pozn. Přerušovaná čára značí kostru transformátoru spojenou s jádrem.

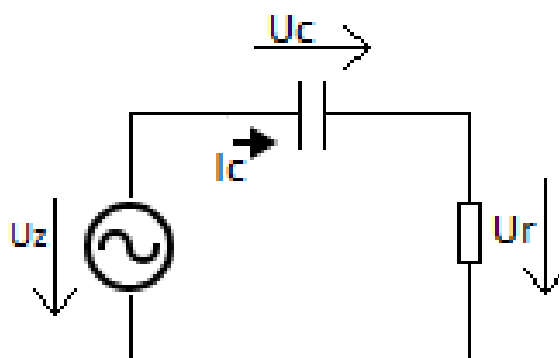
Měření bude probíhat pro frekvence od 1 do 9 kHz.

Tabulka 4.6 Tabulka pro měření unikajícího proudu nepřímou metodou v bodě 4.2.3

Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1			
2			
3			
5			
7			
9			

4.2.4 Výpočet a vyhodnocení parazitní kapacity C_p

Měření parazitních kapacit může vypovídat jak o stavu samotného transformátoru, tak o stavu jeho izolace. Pro demonstraci transformátoru se zhoršenou izolací bude v programu falstad simulován obvod s kapacitou 10 nF, napájecím napětím 230 V a odporem totožným, jako při předchozích bodech měření.



Obrázek 4.17 Schéma zapojení simulovaného obvodu v bodě 4.2.4

U_Z ...Napětí zdroje

U_C , U_R ...Napětí na kondenzátoru, napětí na rezistoru

I_C ...proud procházející kondenzátorem

Do následující tabulky budou doplněny hodnoty unikajícího proudu změřené v předchozím bodě 4.2.2 a hodnoty unikajícího proudu odečtené v programu falstad pro kapacitu C_n .

Tabulka 4.7 Tabulka pro měření unikajících proudů v bodě 4.2.4

	T1	WA942	9WN	C_n
f [kHz]	I_p [μA]	I_p [μA]	I_p [μA]	I_p [μA]
1				
2				
3				
5				
7				
9				

Pro získání hodnoty parazitní kapacity mezi vinutím a jádrem transformátoru pro použité transformátory bude nejprve potřeba vypočítat hodnotu U_C . [26]

$$U_C = U_Z - U_R [V] \quad (4.14)$$

Dále kapacitní reaktanci parazitní kapacity.

$$X_C = \frac{U_C}{I_C} [\Omega] \quad (4.15)$$

A z této kapacitní reaktance již hledanou parazitní kapacitu.

$$C_P = \frac{1}{2 * \pi * f * X_C} = [F] \quad (4.16)$$

Následně bude pro porovnání závislostí unikajícího proudu na frekvenci vynesena graf pro všechny 3 transformátory a pro kapacitu C_p s hodnotou 10 nF, která představuje zvýšenou kapacitu vlivem zhoršeného stavu vinutí.

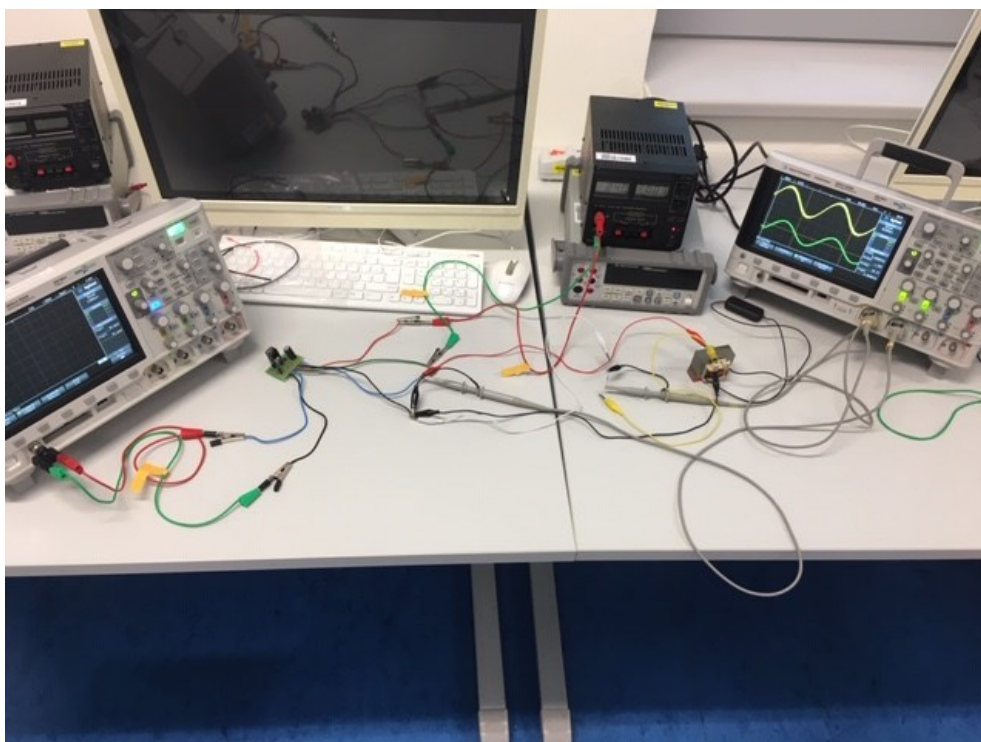
5 Realizace navržených měření

Tato kapitola pojednává o postupu a realizaci navržených měření v kapitole 4.

5.1 Měření unikajících proudů

Postup měření k bodu 4.2.1 návrhu.

Zapojení obvodu dle schématu obrázku 4.14. Měření napětí probíhá na odporu připojeném na kostru transformátoru a GND zesilovače pomocí kanálu osciloskopu 1.



Obrázek 5.1 Zapojení obvodu měření dle schématu 4.14

Postupně byla nastavena frekvence v rozmezí od 300 Hz po 18 kHz, větší frekvence již zesilovač nezvládá. Transformátor byl napájen $U_z = 7,428 \text{ V}$, rezistor R_m byl zvolen $830 \text{ k}\Omega$.

Naměřené hodnoty byly následně přepočteny dle vzorce 4.12, aby odpovídaly skutečnému proudu při připojení na síťové napětí. Dále se vypočet unikající proud dle vzorce 4.13.

Ukázka přepočtu hodnoty U_m na U_{mp} při frekvenci 300 Hz.

$$U_{mp} = K_S * U_m = 199,68 * 10^{-3} * 30,96 = 6,18 \text{ [V]} \quad (5.1)$$

Ukázka výpočtu unikajícího proudu při frekvenci 300 Hz.

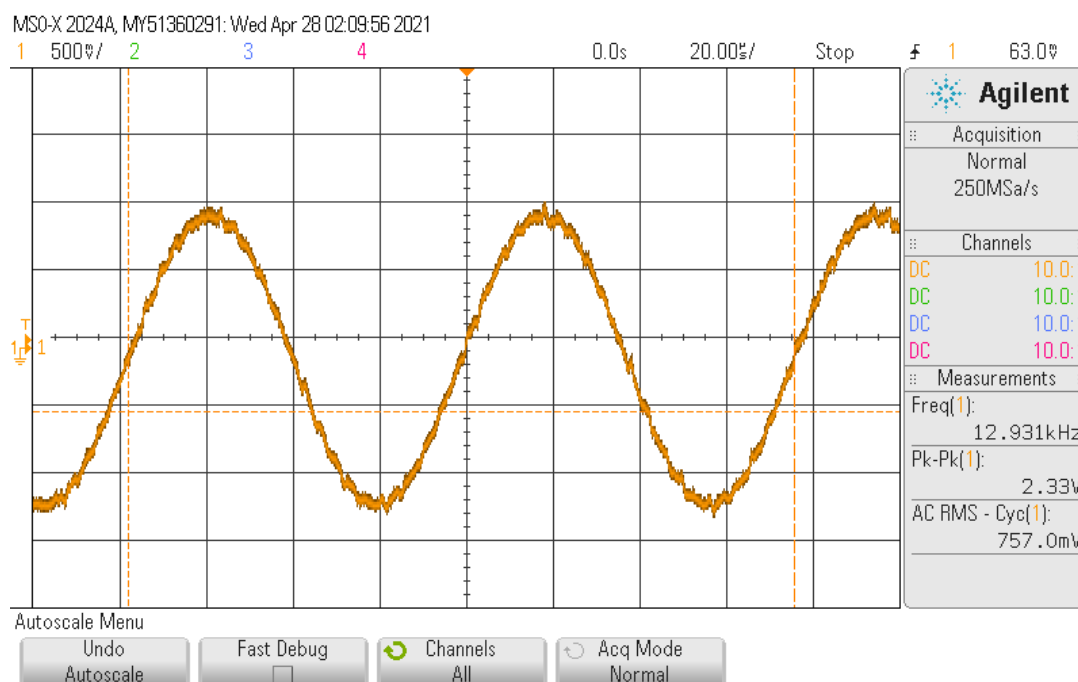
$$I = \frac{U_{mp}}{R} = \frac{6,18}{830 * 10^3} = 7,445 * 10^{-6} \text{ [A]} = 7,45 \text{ [\mu A]} \quad (5.2)$$

Tabulka 5.1 Tabulka naměřených hodnot pro transformátor 1 v bodě 5.1

Transformátor 1			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μA]	U_{mp} [V]
0,3	199,68	7,45	6,18
0,5	226,23	8,44	7,00
0,8	265,31	9,90	8,21
1	296,07	11,04	9,17
2	406,5	15,16	12,59
3	503,8	18,79	15,60
5	622,4	23,22	19,27
7	689	25,70	21,33
9	726,3	27,09	22,49
11	744,5	27,77	23,05
13	757	28,24	23,44
15	763,5	28,48	23,64
18	768,2	28,65	23,78

Hodnota měřeného napětí U_m bylo také zaznamenáno na osciloskopu.

Měření při generovaném signálu s 13 kHz.



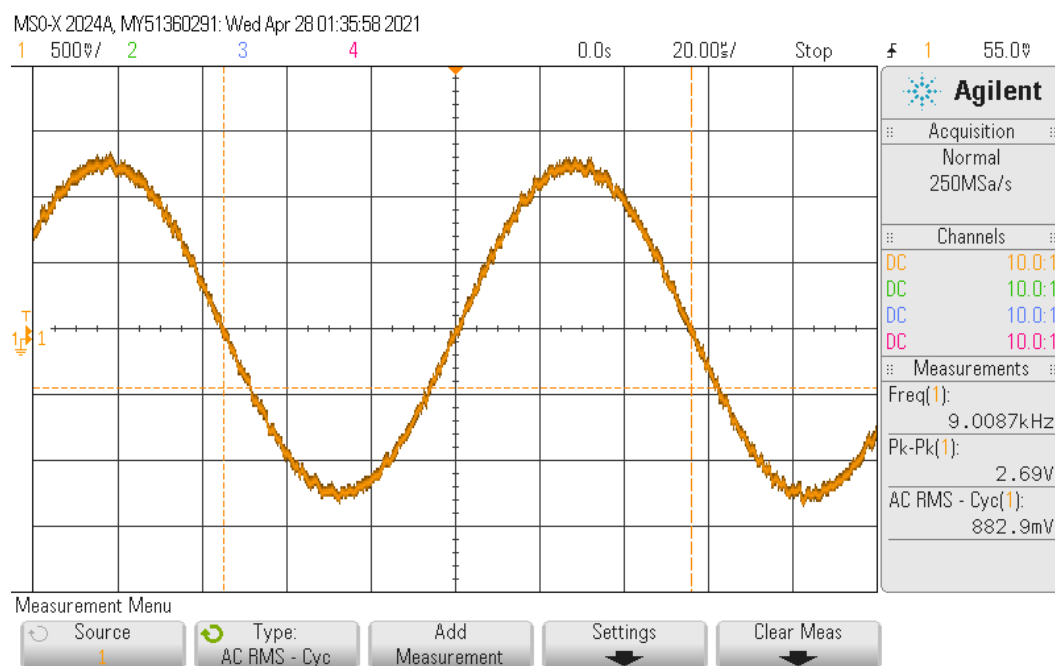
Obrázek 5.2 Měření frekvence a napětí na rezistoru kanálem 1 při frekvenci 13 kHz pro transformátor 1 v bodě 5.1

Měření bylo zopakováno pro druhý transformátor WA 942 o stejných frekvencích.

Tabulka 5.2 Tabulka naměřených hodnot pro transformátor WA 942 v bodě 5.1

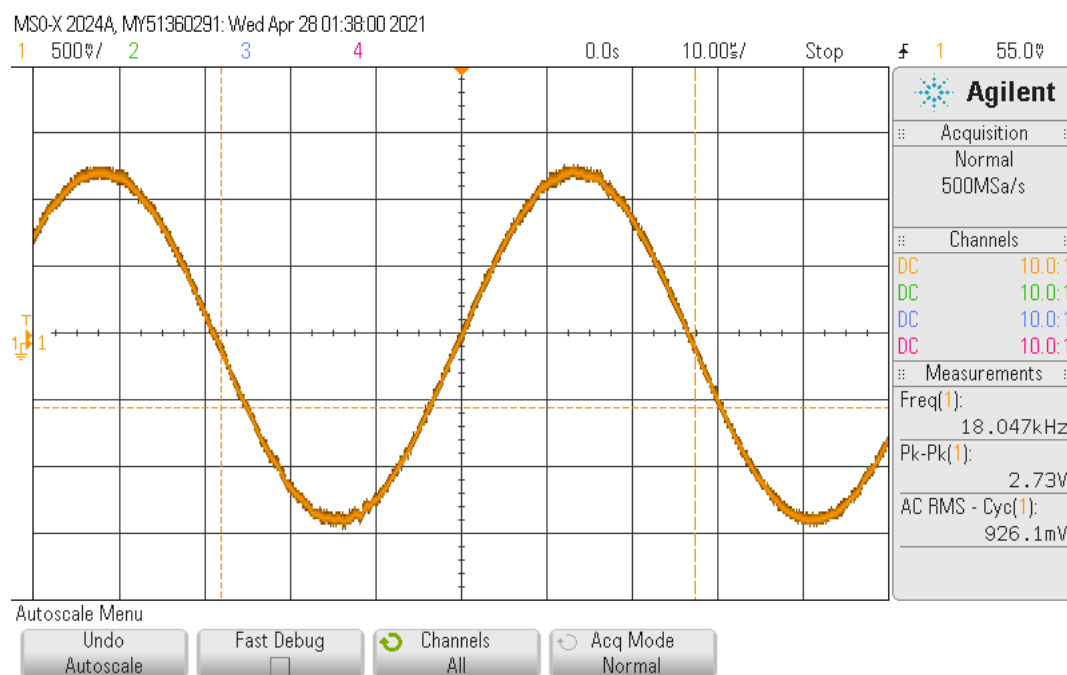
Transformátor WA942			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
0,3	228,43	8,52	7,07
0,5	287,12	10,71	8,89
0,8	324,55	12,11	10,05
1	354,1	13,21	10,96
2	492	18,35	15,23
3	605,7	22,59	18,75
5	755,3	28,17	23,38
7	844,4	31,50	26,14
9	882,9	32,93	27,33
11	907	33,83	28,08
13	920,6	34,34	28,50
15	921,8	34,38	28,54
18	926,1	34,54	28,67

Měření při generovaném signálu 9 kHz.



Obrázek 5.3 Měření frekvence a napětí na rezistoru kanálem 1 při frekvenci 9 kHz pro transformátor WA 942 v bodě 5.1

Měření při generovaném signálu 18 kHz.



Obrázek 5.4 Měření frekvence a napětí na rezistoru kanálem 1 při frekvenci 18 kHz pro transformátor WA 942 v bodě 5.1

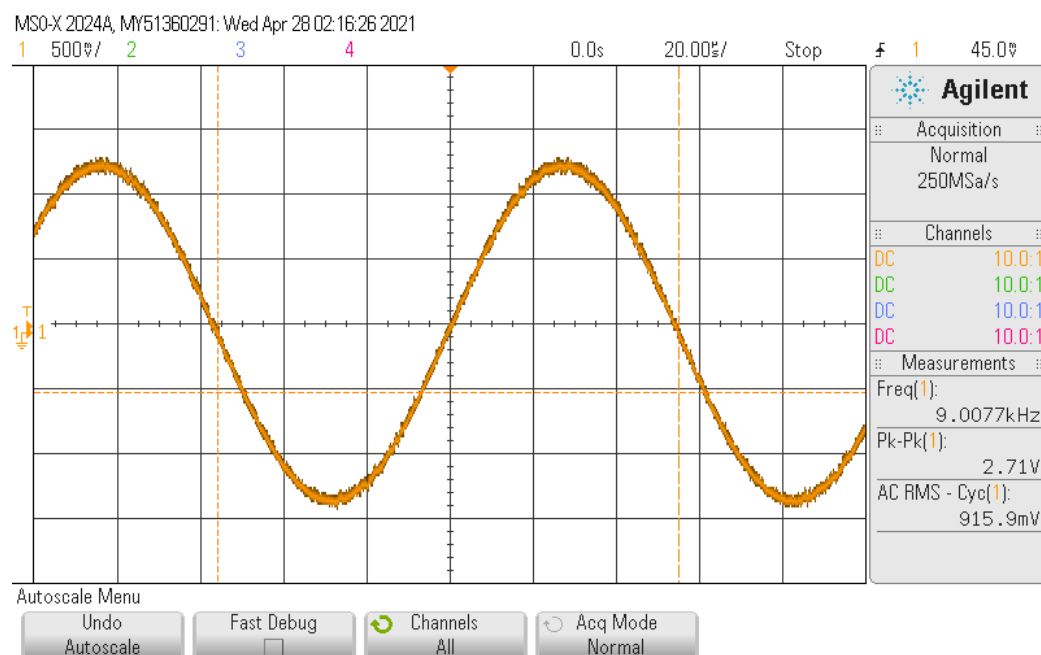
Při vyšších frekvencích se již napětí spíše srovnávalo, a to kvůli limitním parametrům zesilovače.

Měření bylo zopakováno i pro třetí transformátor 9WN se stejnými frekvencemi.

Tabulka 5.3 Tabulka naměřených hodnot pro transformátor 9WN v bodě 5.1

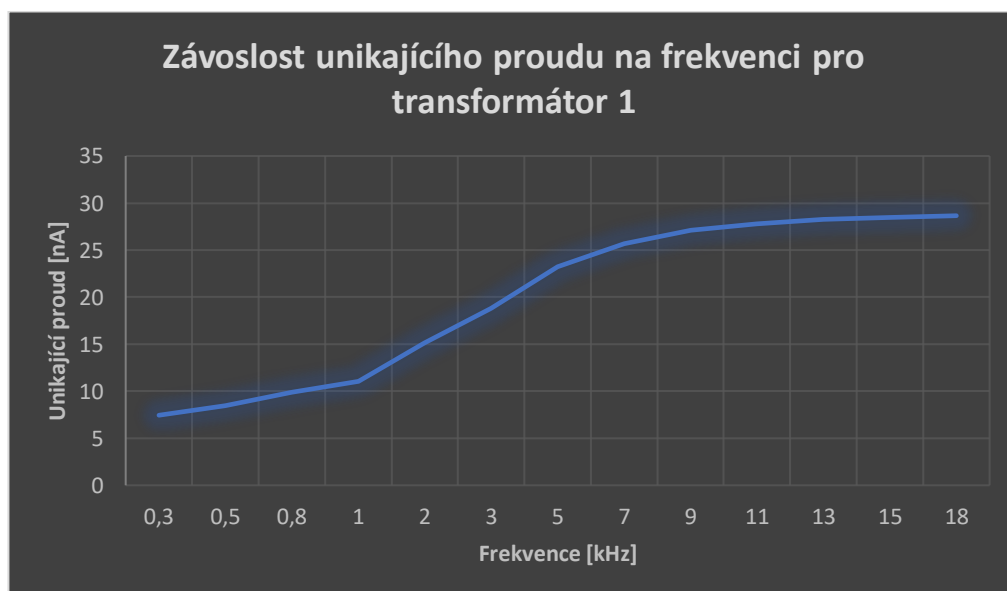
Transformátor 9WN			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
0,3	214,66	8,01	6,65
0,5	246,76	9,20	7,64
0,8	303,3	11,31	9,39
1	339,8	12,67	10,52
2	483,6	18,04	14,97
3	606,8	22,63	18,79
5	772,5	28,82	23,92
7	863,3	32,20	26,73
9	915,9	34,16	28,36
11	950,1	35,44	29,42
13	964,8	35,99	29,87
15	974,1	36,34	30,16
18	982,1	36,63	30,41

Měření při generovaném signálu 9 kHz.

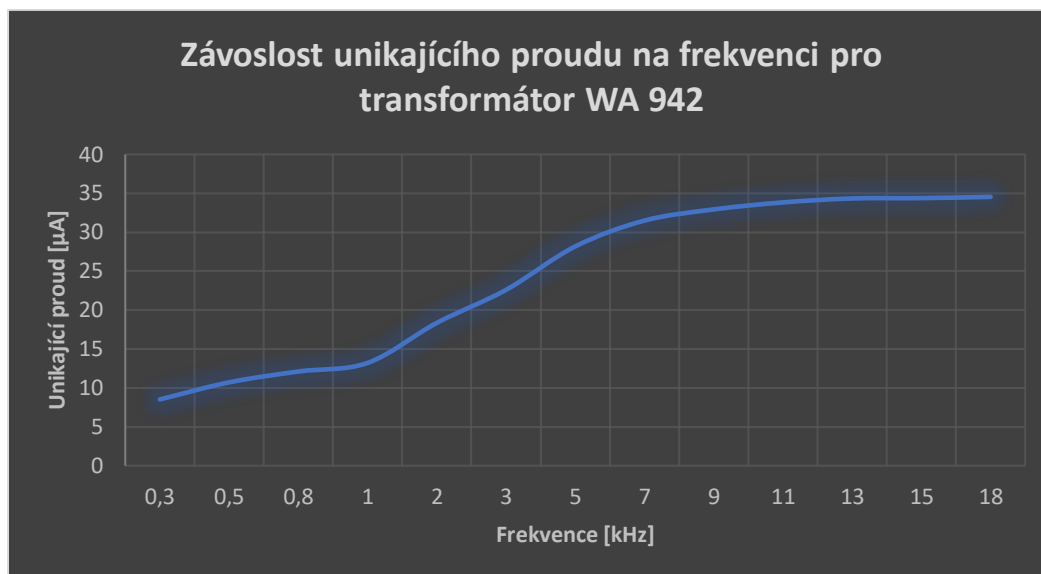


Obrázek 5.5 Měření frekvence a napětí na rezistoru kanálem 1 při frekvenci 9 kHz pro transformátor 9WN v bodě 5.1

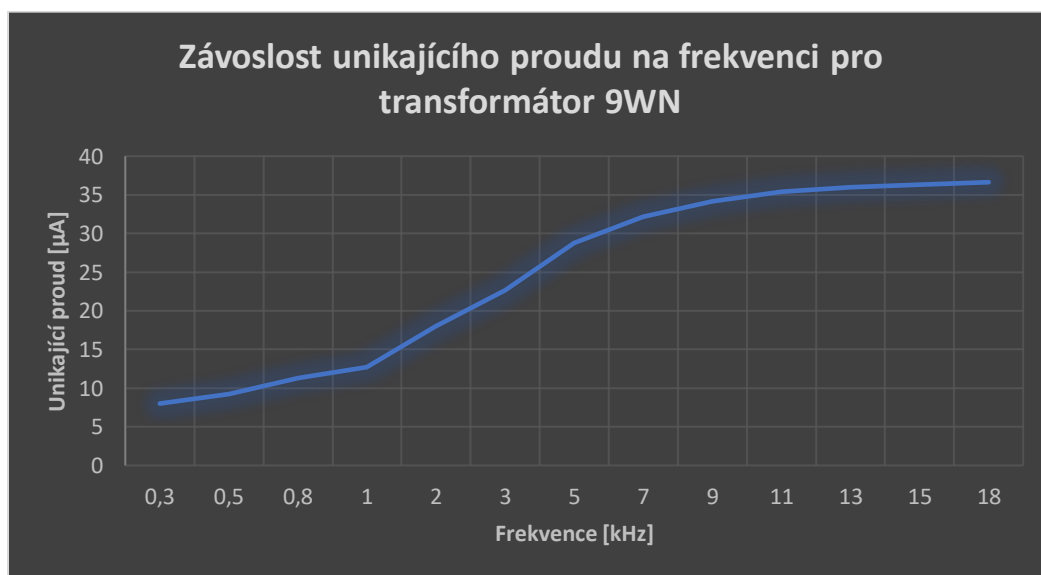
Z naměřených hodnot unikajícího proudu v tabulkách 5.1 až 5.3 byl vynesena graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci.



Obrázek 5.6 Graf závislosti unikajících proudů na frekvenci pro transformátor 1 v bodě 5.1



Obrázek 5.7 Graf závislosti unikajících proudů na frekvenci pro transformátor WA 942 v bodě 5.1



Obrázek 5.8 Graf závislosti unikajících proudů na frekvenci pro transformátor 9WN v bodě 5.1

Na těchto grafech můžeme vidět růst unikajícího proudu při zvyšující se frekvenci, a to vlivem popsaným v kapitole 4.2.1, tedy snižující se kapacitní reaktancí při zvyšující se frekvenci.

5.1.1 Měření unikajících proudů přímou metodou

Postup měření k bodu 4.2.2 návrhu.

Obvod byl zapojen dle obrázku 4.15. Měření probíhalo pro dané frekvence od 1 do 9 kHz.

Postup přepočtu napětí U_m na U_{mp} proběhl stejně, jako v bodě 5.1, tedy podle vzorců 4.12 a 4.13.

Tabulka 5.4 Tabulka naměřených hodnot unikajícího proudu přímou metodou v bodě 5.1.1

Transformátor 9WN			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	293,86	10,96	9,10
2	385,17	14,37	11,92
3	458,7	17,11	14,20
5	549,4	20,49	17,01
7	603,2	22,50	18,68
9	626,8	23,38	19,41
Transformátor WA 942			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	280,13	10,45	8,67
2	374,5	13,97	11,59
3	460,1	17,16	14,24
5	560,3	20,90	17,35
7	617,2	23,02	19,11
9	638,8	23,83	19,78
Transformátor 1			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	258,4	9,64	8,00
2	350,5	13,07	10,85
3	438,9	16,37	13,59
5	551,9	20,59	17,09
7	618,3	23,06	19,14
9	653,7	24,38	20,24

5.1.2 Měření unikajících proudů nepřímou metodou

Postup měření k bodu 4.2.3 návrhu.

Obvod byl zapojen dle obrázku 4.16. Měření probíhalo pro dané frekvence od 1 do 9 kHz.

Postup přepočtu napětí U_m na U_{mp} proběhl stejně, jako v bodě 5.1, tedy podle vzorců 4.12 a 4.13.

Tabulka 5.5 Tabulka naměřených hodnot unikajícího proudu nepřímou metodou v bodě 5.1.2

Transformátor 9WN			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	284,78	10,62	8,82
2	447,7	16,70	13,86
3	564,4	21,05	17,47
5	693,8	25,88	21,48
7	757,7	28,26	23,46
9	786,2	29,33	24,34
Transformátor Wa942			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	317,88	11,86	9,84
2	448,5	16,73	13,89
3	560,7	20,91	17,36
5	699,8	26,10	21,67
7	767,6	28,63	23,76
9	801,2	29,89	24,81
Transformátor 1			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	289,05	10,78	8,95
2	425,43	15,87	13,17
3	536,48	20,01	16,61
5	689,4	25,72	21,34
7	771,3	28,77	23,88
9	814,9	30,40	25,23

Pro vizuální vyhodnocení odchylky mezi těmito dvěma metodami byly hodnoty unikajícího proudu zprůměrovány a zaneseny do grafu. Pro každou z metod se vytvořil průměr z hodnot unikajícího proudu na všech 3 transformátorech, a to pro každou frekvenci.

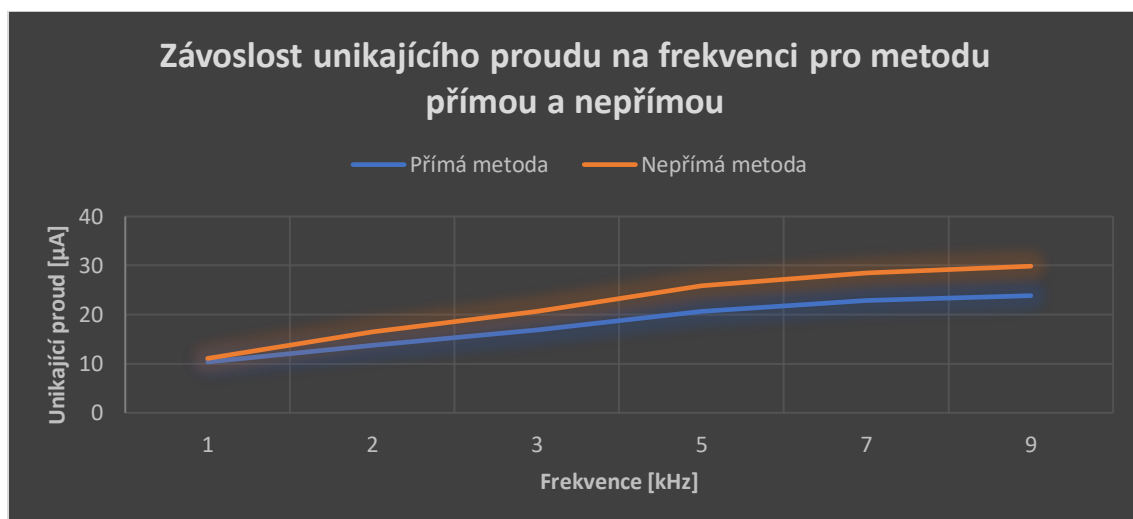
Příkladem: Pro frekvenci 1 kHz byl vypočítán průměr naměřené hodnoty unikajícího proudu na všech 3 transformátorech.

Tabulka 5.6 Průměr hodnot unikajících proudů v bodě 5.1.2

Průměr	
Přímá metoda	Nepřímá metoda
I_P [μ A]	I_P [μ A]
10,35	11,09
13,80	16,43
16,88	20,66
20,66	25,90
22,86	28,56
23,86	29,87

Již z tabulky je patrné, že nižší hodnoty ukazovala v průměru metoda přímá, tyto hodnoty jsou tedy přesnější, a to z důvodu zapojení napájení v obvodu této metody.

Na dalším obrázku je grafické znázornění.



Obrázek 5.9 Vyhodnocení přesnosti metod měření unikajících proudů v bodě 5.1.2

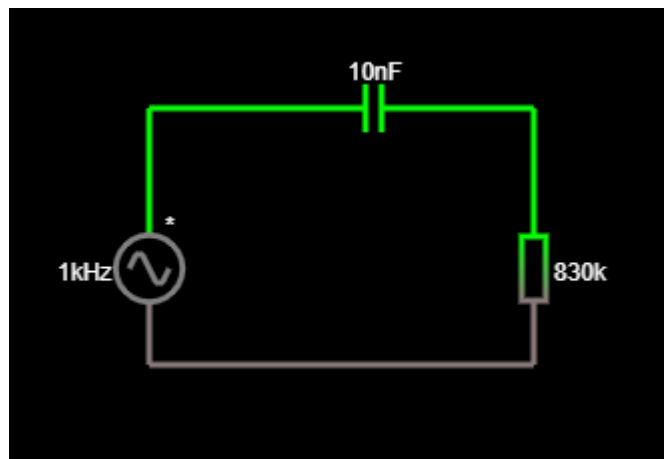
Důležité je zjištění, že unikající proudy žádného z měřených transformátorů nepřevyšovaly maximální danou hranici 3,5 mA, tedy proud, který smí téct ochranným vodičem.

5.2 Výpočet a vyhodnocení parazitní kapacity C_p

Postup měření k bodu 4.2.4 návrhu.

V programu falstad byl vytvořen obvod pro měření proudu obvodem s kapacitou C_p , která představuje zvýšenou parazitní kapacitu transformátoru, vlivem poškození jeho izolace.

Kód pro vložení obvodu do falstadu je přiložen v příloze A.



Obrázek 5.10 Schéma simulovaného obvodu v rozhraní falstad v bodě 5.2

V simulovaném obvodu byla postupně zvyšována frekvence od 1 do 9 kHz a odečítán proud I_p . Ten byl následně, spolu s unikajícím proudem, změřeným v předchozím bodě 5.1.1, na třech transformátorech, zapsán do tabulky níže.

Tabulka 5.7 Tabulka naměřených hodnot unikajících proudů v bodě 5.2

	T1	WA942	9WN	Cn
f [kHz]	I_p [μ A]	I_p [μ A]	I_p [μ A]	I_p [μ A]
1	9,64	10,45	10,96	271,852
2	13,07	13,97	14,37	274,619
3	16,37	17,16	17,11	275,33
5	20,59	20,9	20,49	276,09
7	23,06	23,02	22,5	276,415
9	24,38	23,83	23,38	276,602

Výpočet hodnoty parazitní kapacity mezi vinutím a jádrem transformátoru pro použité transformátory byl vypočítán dle vzorců 4.14 až 4.16. [26]

Pro transformátor 1:

$$U_C = U_Z - U_R = 230 - 8 = 222 \text{ [V]} \quad (5.3)$$

$$X_C = \frac{U_C}{I_C} = \frac{222}{9,64 \cdot 10^{-6}} = 23,029 \text{ [M}\Omega\text{]} \quad (5.4)$$

$$C_{PT1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 23,029 \cdot 10^6} = 6,91 \cdot 10^{-12} \text{ [F]} \quad (5.5)$$

$$C_{PT1} = 6,91 \text{ [pF]} \quad (5.6)$$

Pro transformátor WA 942:

$$U_C = 230 - 8,67 = 221,33 \text{ [V]} \quad (5.7)$$

$$X_C = \frac{221,33}{10,45 \cdot 10^{-6}} = 22,1799 \text{ [M}\Omega\text{]} \quad (5.8)$$

$$C_{PWA942} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 22,1799 \cdot 10^6} = 7,18 \cdot 10^{-12} \text{ [F]} \quad (5.9)$$

$$C_{PWA942} = 7,18 \text{ [pF]} \quad (5.10)$$

Pro transformátor 9WN:

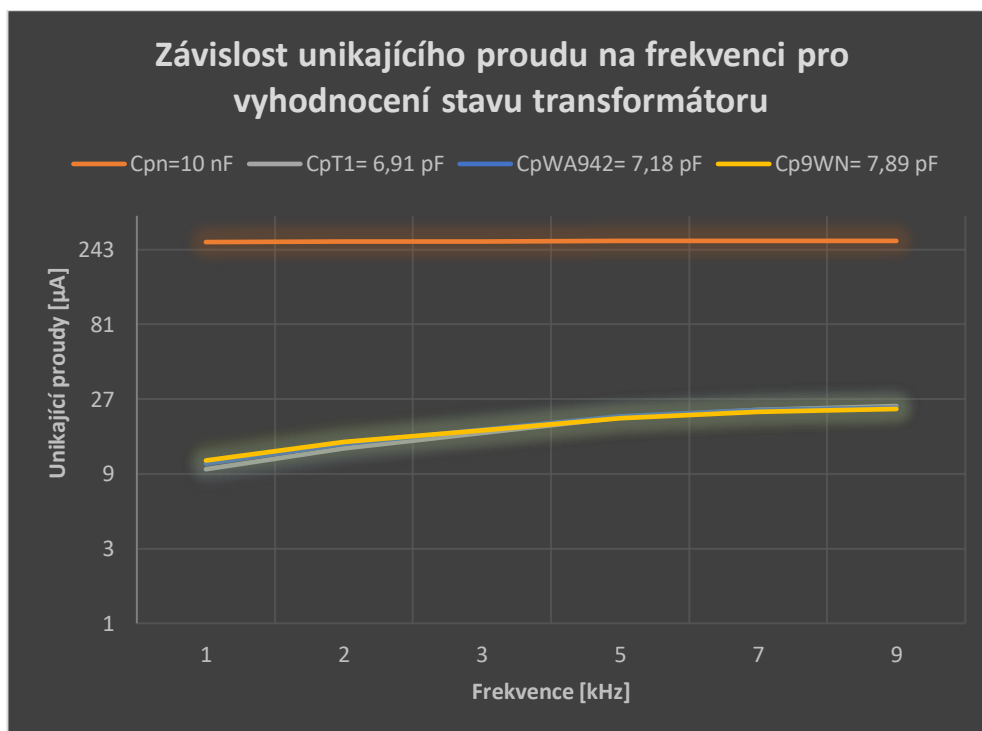
$$U_C = 230 - 9,1 = 220,9 \text{ [V]} \quad (5.11)$$

$$X_C = \frac{220,9}{10,96 \cdot 10^{-6}} = 20,155 \text{ [M}\Omega\text{]} \quad (5.12)$$

$$C_{P9WN} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 20,155 \cdot 10^6} = 7,89 \cdot 10^{-12} \text{ [F]} \quad (5.13)$$

$$C_{P9WN} = 7,89 \text{ [pF]} \quad (5.14)$$

Po vynesení závislostí unikajícího proudu na frekvenci pro všechny změřené transformátory a simulovanou parazitní kapacitu, je možné pozorovat, že unikající proud transformátoru se simulovanou parazitní kapacitou, je mnohonásobně větší. Lze tedy jednoduše určit, že by měl tento transformátor, při podobných parametrech, nějakým způsobem poškozenou izolaci vinutí. Z důvodu velkého rozdílu unikajícího proudu byla svislá osa s hodnotami tohoto proudu vynesena s logaritmickou stupnicí tak, aby šlo na první pohled zaznamenat, jak velký rozdíl mezi unikajícími proudy pro dané parazitní kapacity je.



Obrázek 5.11 Graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci při rozdílných parazitních kapacitách v bodě 5.2

6 Vypracování příslušné laboratorní úlohy



Měření elektrických přístrojů

Protokol o měření

Měření unikajících proudů na izolačním transformátoru

Přeček Daniel, PRE0085

3.4. 2021

6.1 Cíl úlohy

Prostřednictvím této laboratorní úlohy se naučíte:

- Chápat problematiku unikajících proudů z hlediska bezpečnosti
- Měřit a vyhodnocovat unikající proudy

6.2 Zadání

1. Změřte unikající proudy přímou metodou
2. Změřte unikající proudy nepřímou metodou
3. Vyneste graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci napájecího signálu pro všechny 3 transformátory a vyhodnoťte, která metoda je přesnější
4. Vyneste do grafu Vámi naměřené hodnoty unikajícího proudu pro libovolný transformátor a zadané hodnoty pro poškozený transformátor a srovnajte je.

6.3 Předpokládané znalosti

K této úloze nejsou doporučeny žádné znalosti této látky, neboť v tomto stádiu ještě nebyly v rámci výuky probírány.

6.4 Použité vybavení

- Laboratorní zdroj 24 V stejnosměrných Manson EP-613
- 3x měřený transformátor
- Zesilovač signálu 20W s TDA 2030
- 2x Osciloskop Agilent MSO-X2024A
- Rezistor R_m 830 k Ω (1 M Ω)

6.5 Teoretický rozbor

Transformátory jsou určeny pro napájení různých aplikací. Jeden z několika typů transformátoru se nazývá izolační. Takový transformátor má galvanicky oddělená vstupní a výstupní vinutí. Využití najde i ve zdravotnictví jako ochranné opatření při provozu přístrojů ve zdravotnických prostorách, přesněji se jedná o elektrické oddělení napájení, dalších obvodů a země od spotřebiče při jeho poruše. Ochranné oddělení je z důvodu bezpečnosti nezbytné při práci s nízkým napětím (230 V).

Elektrické stroje musí splňovat určité požadavky, ať už se jedná o technický stav přístroje či jeho funkčnost. I tyto přístroje časem stárnou, a proto potřebují pravidelnou kontrolu či případnou údržbu. Těmito úkony se zabývají například revizní technici, kteří postupují dle stanovených metod a postupů. Tyto postupy jsou určovány jedním z mnoha odvětví vědního oboru metrologie, zkušebnictvím.

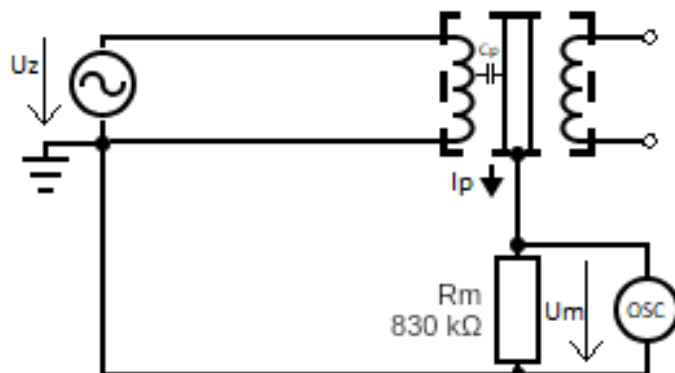
Ve zdravotnictví jsou takové úkony revizních techniků nazývány bezpečnostně technickou kontrolou (BTK) a jsou legislativně stanoveny. V tomto odvětví se BTK používá převážně ke kontrole správné funkčnosti, stavu a bezpečnosti zdravotnických přístrojů. BTK se obvykle pravidelně provádí s periodicitou jednoho roku. K provádění servisu daných zdravotnických prostředků musejí mít v dnešní době pracovníci školení od daného výrobce. Dokumentaci o školení kontroluje například SÚKL Praha, který dále kontroluje také dokumentaci o dodržování zákonem (zákon č. 268/2014 Sb.) stanovených periodických kontrolách, záznamy o opravách, instrukcích či přítomnosti návodu v českém jazyce.

Unikající proudy jsou jednou z veličin, které se při BTK přeměřují. Ty se z důvodu bezpečnosti musejí kontrolovat, aby nepřekročily maximální povolenou bezpečnou hodnotu. U nepoškozeného spotřebiče se tento proud nazývá konstrukční. Ten v bezporuchovém stavu protéká do neživých částí a do země. Druhou složkou unikajících proudů je proud, který protéká při poruše. Unikající proudy norma rozděluje na proud, který protéká ochranným vodičem a dotykový proud, který protéká přes obsluhu či pacienta do země. Zejména při přímém kontaktu živé části přístroje při zákroku je nezbytné zamezit překročení hraniční hodnoty unikajících proudů.

Principem unikajícího proudu je odvedení proudu přes izolovanou část spotřebiče do dalších částí spojených s vodičem PE (ochranným vodičem). U spotřebičů třídy ochrany I se měří proud tekoucí ochranným vodičem PE, kdy tento proud nesmí být vyšší než zavedená maximální hodnota 3,5 mA. U spotřebičů třídy ochrany II se měří dotykový proud vodivými částmi přístroje, kdy proud nesmí být vyšší než maximální hodnota 0,5 mA.

1. Přímá metoda měření unikajících proudů

Tato metoda patří k nejpřesnějším metodám, a to z důvodu měření unikajícího proudu za normálního provozu. V takovém stavu se měří již zmíněný proud unikající přes ochranný vodič do země nebo dotkový proud tekoucí vodivými částmi krytu. Měřený zdravotnický prostředek, který je objektem měření, však musí být v době měření svým uložením izolován od země, aby se zamezilo odchylky náhodného uzemnění. Za výhody této metody lze považovat její vysoká přesnost při měření malých unikajících proudů. Metoda se nejvíce ze všech zmíněných přibližuje reálné hodnotě unikajících proudů.



Obrázek 6.1 Schéma zapojení pro přímou metodu v bodě 6.5

I_p ...unikající proud z kostry do uzemnění

R_m ...měřený rezistor

C_p ...parazitní kapacita mezi vinutím a jádrem a mezi oběma vinutími.

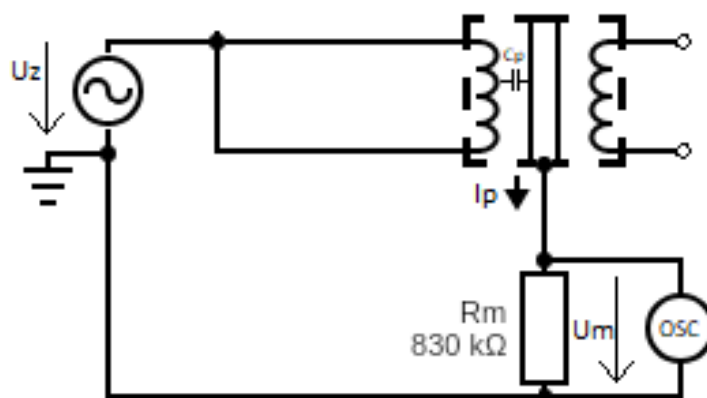
U_m ...napětí na měřeném rezistoru

U_z ...napětí zdroje

Pozn. Přerušovaná čára značí kostru transformátoru spojenou s jádrem

2. Nepřímá metoda měření unikajících proudů

Jak je již z názvu patrné, měření probíhá nepřímo. Na rozdíl od metody přímé se neměří za normálního provozu, ale využívá se pomocného zdroje o střídavém napětí 230 V / 50 Hz. S pomocí tohoto zdroje se následně na odporu o 2 kΩ, fungujícího jako simulace odporu lidského těla, měří unikající proudy způsobem vzájemného zkratování pracovních vodičů a jejich připojením k pomocnému zdroji. Výhodou této metody je její snadná opakovatelnost, a to i z toho důvodu, že je měřený přístroj a síť galvanicky oddělená. Tuto metodu není možné použít pro měření na přístrojích s aktivními obvody (spínané zdroje nebo relé).



Obrázek 6.2 Schéma zapojení pro nepřímou metodu v bodě 6.5

I_p ...unikající proud z kostry do uzemnění

R_m ...měřený rezistor

C_p ...parazitní kapacita mezi vinutím a jádrem a mezi oběma vinutími.

U_m ...napětí na měřeném rezistoru

U_Z ...napětí zdroje

Pozn. Přerušovaná čára značí kostru transformátoru spojenou s jádrem.

Z důvodu bezpečnosti se v této úloze pracuje s malým napájecím napětím. Pro možnost srovnání výsledků s normou danou maximální hodnotou unikajícího proudu se bude veškeré napětí přepočítávat konstantou K_S na síťové napětí.

$$K_S = \frac{230}{U_Z} = [-] \quad (6.1)$$

Závislost velikosti unikajícího proudu na parazitní kapacitě

Unikající proud transformátorem uniká skrze parazitní kapacity mezi vinutími a jádrem. Přes toto jádro následně může díky náhodnému uzemnění či dotyku osoby snadno protéct do uzemnění. Proud tekoucí touto cestou lze zvyšovat či snižovat v závislosti měnící se kapacitní reaktance na měnící se frekvenci. Čím vyšší je frekvence napájecího signálu, tím menší je kapacitní reaktance parazitní kapacity a může tímto místem protékat větší proud.

Pro získání hodnoty parazitní kapacity mezi vinutím a jádrem transformátoru je nejprve potřeba vypočítat hodnotu U_C .

$$U_C = U_Z - U_{mp} [V] \quad (6.2)$$

Dále kapacitní reaktanci parazitní kapacity.

$$X_C = \frac{U_C}{I_C} [\Omega] \quad (6.3)$$

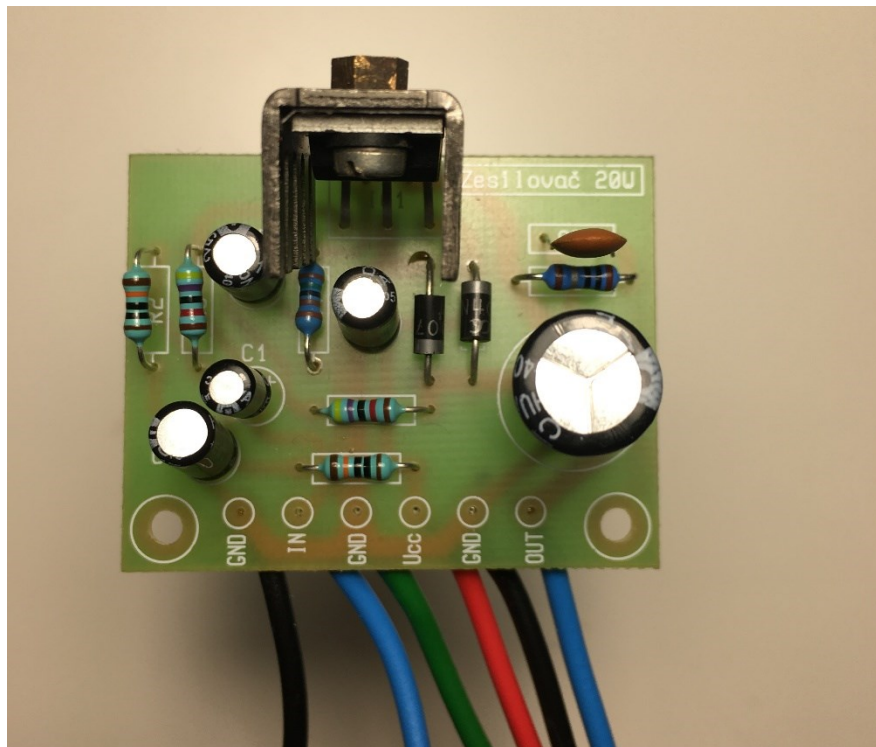
A z této kapacitní reaktance již hledanou parazitní kapacitu.

$$C_P = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = [F] \quad (6.4)$$

6.6 Pracovní postup

6.6.1 Postup k bodu č.1 zadání

1. Zapojte obvod dle schématu 6.1, jako zdroj obvodu zapojte zesilovač TDA2030 následovně:



Obrázek 6.3 Zapojení zesilovače TDA2030 v bodě 6.6.1

na UCC a GND připojte zdroj stejnosměrného napětí, na IN a GND připojte osciloskop v režimu generátoru, na OUT a GND připojte obvod s měřeným transformátorem. Důležité je myslet na izolované uložení měřeného přístroje (na stole), aby nevznikalo náhodné uzemnění se zemí. Rezistor R_m připojte ke kostře transformátoru a GND zesilovače. Měřící sondu osciloskopu měřící úbytek napětí na rezistoru R_m připojte ke kanálu 1 osciloskopu.

Zapněte osciloskopy a zdroj stejnosměrného napětí a nastavte tyto hodnoty:

- Generátor Osciloskopu – U_{p-p} 650 mV, frekvence 1 kHz
 - Stejnosměrný zdroj – 24 V
2. Po nastavení hodnot si na papír a graficky zaznamenejte signál na výstupu zesilovače pomocí kanálu 2 osciloskopu. To provedete v sekci „measure“ -> „voltage“ -> „RMS cycle“. Po odečtení hodnoty si vypočtete koeficient K_s dle vzorce 6.1.
 3. Následně zvyšujte frekvenci na generátoru signálu od 1 kHz po 9 kHz dle tabulky 6.1 a zaznamenejte si hodnoty efektivního napětí U_m na rezistoru R_m .

4. Dále pak bude potřeba přepočítat hodnotu změřeného napětí U_m pomocí konstanty K_S na hodnotu rovnající se síťovému napětí U_{mp} .

$$U_{mp} = K_S * U_m = [V] \quad (6.5)$$

5. Následně bude možné z Ohmova zákona vypočítat unikající proud tekoucí rezistorem R_m .

$$I = \frac{U_{mp}}{R} [A] \quad (6.6)$$

6. Pro lepší čitelnost budou hodnoty proudu přepočteny na hodnoty μA .
7. Měření zopakujte pro všechny 3 transformátory.
8. Po dokončení měření vypněte všechny přístroje.

Tabulka 6.1 Měření unikajících proudů na transformátorech v bodě 6.6.1

Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μA]	U_{mp} [V]
1			
2			
3			
5			
7			
9			

6.6.2 Postup k bodu č.2 zadání

Zapojte obvod dle schématu 6.2 a postupujte totožně jako v bodě 6.6.1, bod 2 již opakovat nemusíte.

6.6.3 Postup k bodu č.3 zadání

Z naměřených hodnot v bodech 6.6.1 a 6.6.2 vynesete závislost unikajícího proudu I_p na frekvenci zdroje. Metody v předchozích dvou bodech srovnajte a vyhodnoťte, zda měřené transformátory splňují normou dané mezní hodnoty unikajícího proudu.

6.6.4 Postup k bodu č.4 zadání

Pro demonstraci transformátoru se sníženou izolací jsou v tabulce 6.2 zapsány hodnoty unikajícího proudu, tento transformátor má parazitní kapacitu mezi vinutím a jádrem C_n 10 nF.

1. Zapište do tabulky 6.2 hodnoty unikajícího proudu, naměřené v předchozím měření 6.6.1 přímou metodou, pro Vámi zvolený transformátor.

2. Vypočtete parazitní kapacitu Vámi vybraného transformátoru dle vzorců 6.2 až 6.4
3. Vyneste do jednoho grafu závislost unikajícího proudu pro Vámi zvolený transformátor a vadný transformátor a pozorujte rozdíl.

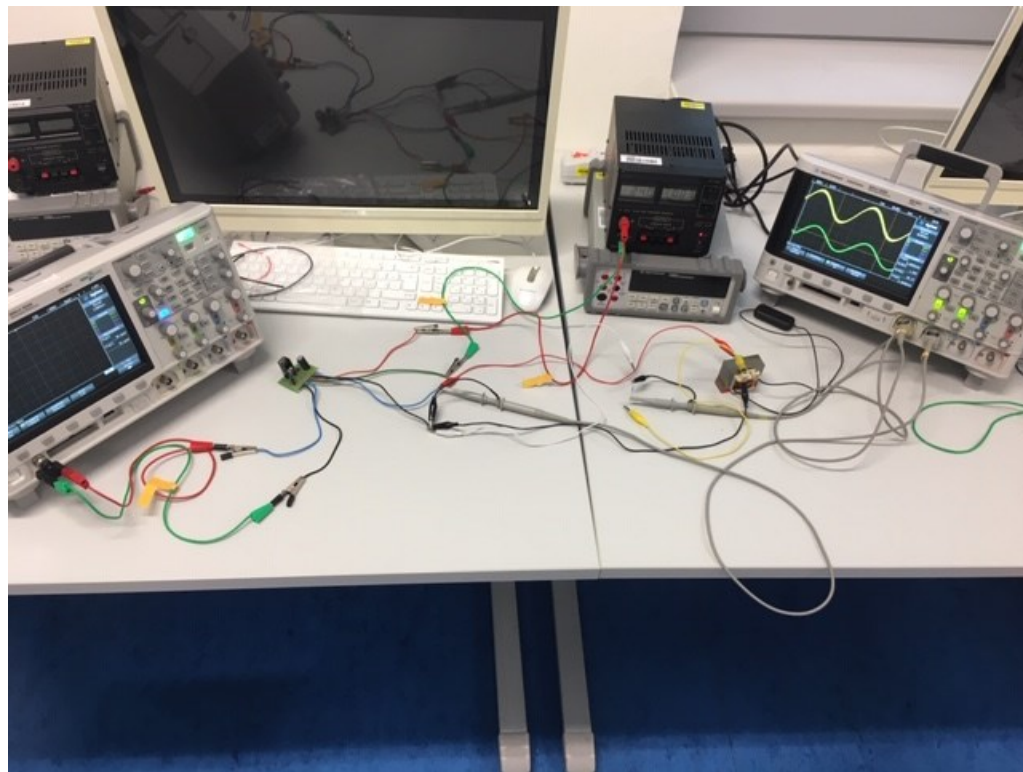
Tabulka 6.2 Tabulka naměřených hodnot unikajících proudů v bodě 6.6.4

	Měřený transformátor	Vadný transformátor
f [kHz]	I_p [μA]	I_p [μA]
1		271,852
2		274,619
3		275,33
5		276,09
7		276,415
9		276,602

6.7 Výsledky měření

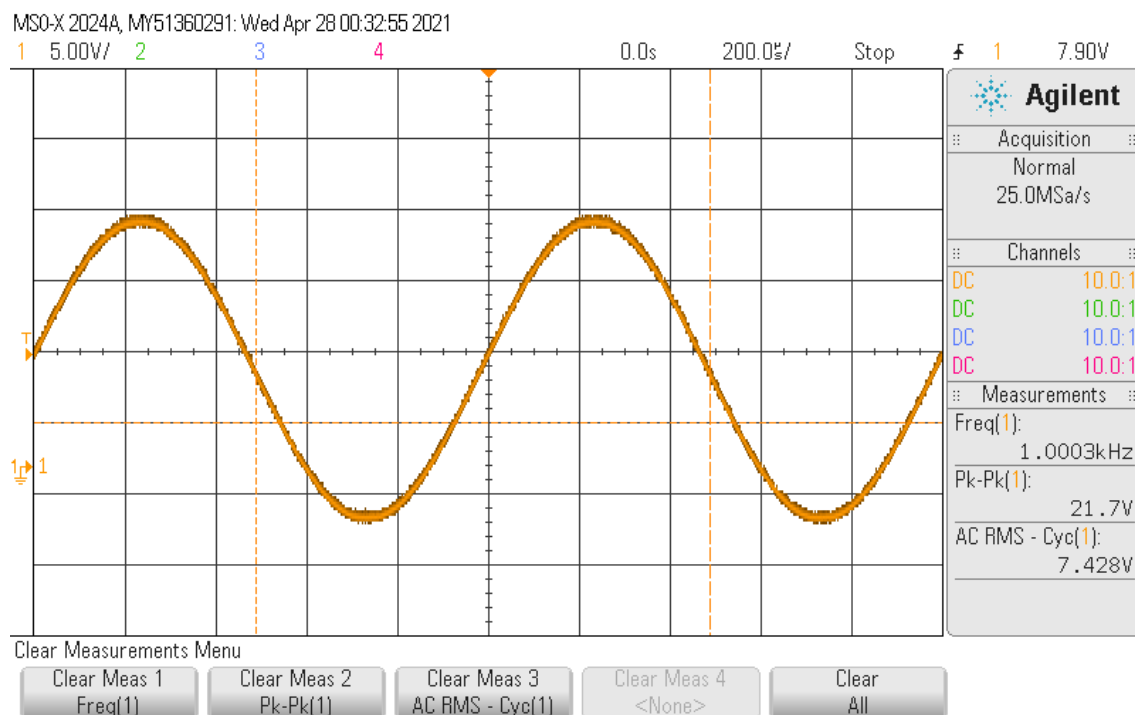
6.7.1 Výsledky měření bodu č. 1 zadání.

Obvod byl zapojen podle schématu 6.1



Obrázek 6.4 Zapojení obvodu dle schématu v bodě 6.7.1

Po zapnutí přístrojů bylo odečteno efektivní napětí na výstupu zesilovače a zaznamenáno pomocí osciloskopu. Hodnota U_z je tedy 7,428 V.



Obrázek 6.5 Záznam výstupního napětí zesilovače v bodě 6.7.1

Dále byl vypočten koeficient K_S dle vzorce 6.1.

$$K_S = \frac{230}{U_z} = \frac{230}{7,428} = 30,96 [-] \quad (6.7)$$

Napětí U_m bylo vynásobeno dle vzorce 6.5 pro získání hodnoty U_{mp} při síťovém napětí.

$$U_{mp} = K_S * U_m = 30,96 * 293,86 * 10^{-3} = 9,1 [V] \quad (6.8)$$

Unikající proud I_p byl vypočten dle vzorce 6.6.

$$I = \frac{U_{mp}}{R} = \frac{9,1}{830 * 10^3} = 10,96 * 10^{-6} [A] \quad (6.9)$$

Tabulka 6.3 Naměřené hodnoty pro transformátor 9WN v bodě 6.7.1

Transformátor 9WN			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μA]	U_{mp} [V]
1	293,86	10,96	9,10
2	385,17	14,37	11,92
3	458,7	17,11	14,20
5	549,4	20,49	17,01
7	603,2	22,50	18,68
9	626,8	23,38	19,41

Tabulka 6.4 Naměřené hodnoty pro transformátor WA 942 v bodě 6.7.1

Transformátor WA 942			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	280,13	10,45	8,67
2	374,5	13,97	11,59
3	460,1	17,16	14,24
5	560,3	20,90	17,35
7	617,2	23,02	19,11
9	638,8	23,83	19,78

Tabulka 6.5 Naměřené hodnoty pro transformátor 1 v bodě 6.7.1

Transformátor 1			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	258,4	9,64	8,00
2	350,5	13,07	10,85
3	438,9	16,37	13,59
5	551,9	20,59	17,09
7	618,3	23,06	19,14
9	653,7	24,38	20,24

6.7.2 Výsledky měření bodu č. 2 zadání.

Zapojení bylo změněno dle schéma 6.2. Postup měření a výpočtu zůstal stejný.

Tabulka 6.6 Naměřené hodnoty pro transformátor 9WN v bodě 6.7.2

Transformátor 9WN			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_p [μ A]	U_{mp} [V]
1	284,78	10,62	8,82
2	447,7	16,70	13,86
3	564,4	21,05	17,47
5	693,8	25,88	21,48
7	757,7	28,26	23,46
9	786,2	29,33	24,34

Tabulka 6.7 Naměřené hodnoty pro transformátor WA 942 v bodě 6.7.2

Transformátor Wa942			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_P [μ A]	U_{mp} [V]
1	317,88	11,86	9,84
2	448,5	16,73	13,89
3	560,7	20,91	17,36
5	699,8	26,10	21,67
7	767,6	28,63	23,76
9	801,2	29,89	24,81

Tabulka 6.8 Naměřené hodnoty pro transformátor 1 v bodě 6.7.2

Transformátor 1			
Frekvence [kHz]	U_m [mV]	Unikající proud I_P [μ A]	U_{mp} [V]
1	289,05	10,78	8,95
2	425,43	15,87	13,17
3	536,48	20,01	16,61
5	689,4	25,72	21,34
7	771,3	28,77	23,88
9	814,9	30,40	25,23

6.7.3 Výsledky měření bodu č. 3 zadání.

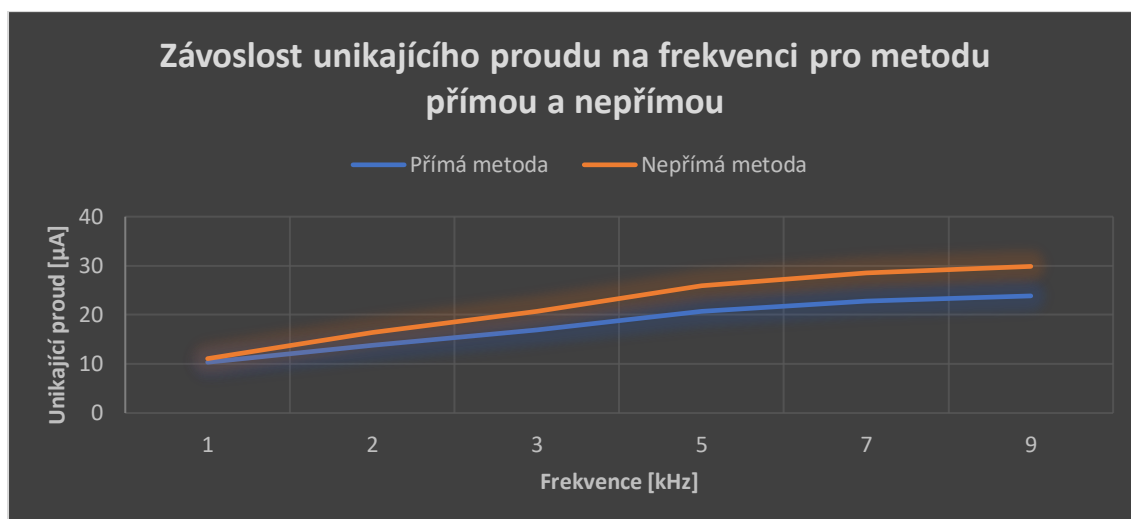
Z výsledků měření unikajícího proudu pro metodu přímou byt vytvořen průměr hodnot pro každou zadanou frekvenci, totéž bylo provedeno pro metodu nepřímou.

Tabulka 6.9 Průměr hodnot metody přímé a nepřímé v bodě 6.7.3

Průměr hodnot	
Přímá metoda	Nepřímá metoda
I_P [μ A]	I_P [μ A]
10,35	11,09
13,80	16,43
16,88	20,66
20,66	25,90
22,86	28,56
23,86	29,87

Z něj pak byly vyneseny závislosti unikajícího proudu na frekvenci pro obě metody.

Již z tabulky je patrné, že nižší hodnoty ukazovala v průměru metoda přímá, tyto hodnoty jsou tedy přesnější, a to z důvodu zapojení napájení v obvodu této metody.



Obrázek 6.6 Graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci pro obě metody v bodě 6.7.3

Důležité je zjištění, že unikající proudy žádného z měřených transformátorů nepřevyšovaly maximální danou hranici 3,5 mA, tedy proud, který smí téct ochranným vodičem.

6.7.4 Výsledky měření bodu č. 4 zadání.

Naměřené hodnoty unikajícího proudu pro vybraný transformátor 9WN.

Tabulka 6.10 Tabulka naměřených hodnot unikajícího proudu v bodě 6.7.4

	9WN - 7,89 pF	Cn - 10 nF
f [kHz]	I_p [μA]	I_p [μA]
1	10,96	271,852
2	14,37	274,619
3	17,11	275,33
5	20,49	276,09
7	22,5	276,415
9	23,38	276,602

Pro získání hodnoty parazitní kapacity mezi vinutím a jádrem transformátoru je nejprve potřeba vypočítat hodnotu U_C .

$$U_C = U_Z - U_{mp} = 230 - 9,1 = 220,9 \text{ [V]} \quad (6.10)$$

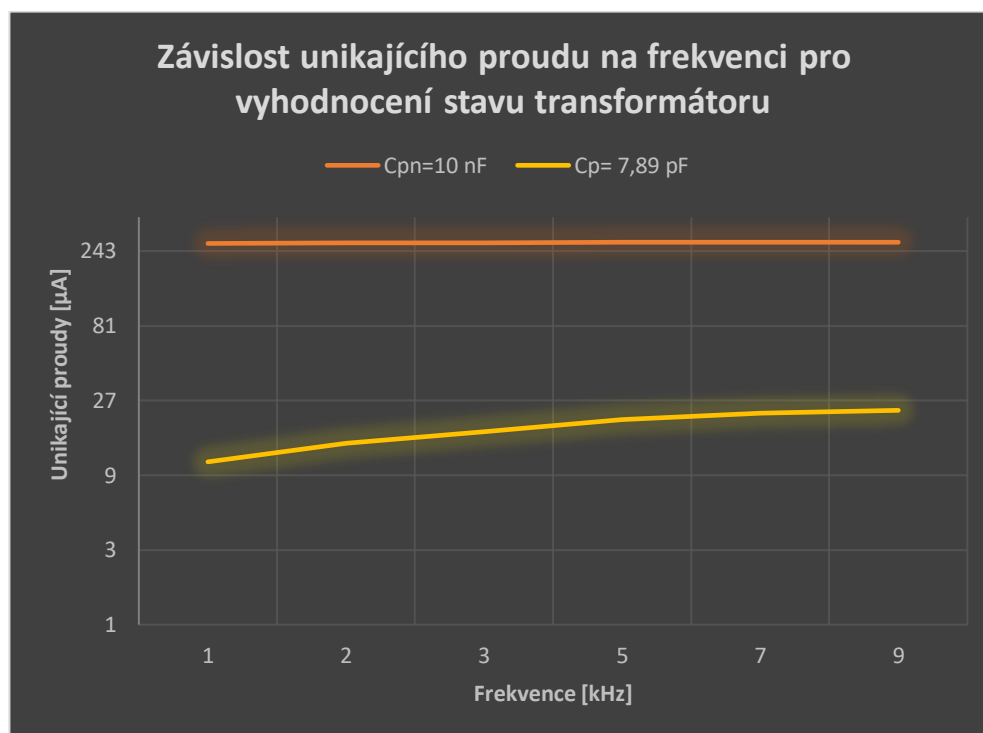
Dále kapacitní reaktanci parazitní kapacity.

$$X_C = \frac{U_C}{I_C} = \frac{220,9}{10,96 \cdot 10^{-6}} = 20,155 \cdot 10^6 \text{ [\Omega]} \quad (6.11)$$

A z této kapacitní reaktance již hledanou parazitní kapacitu.

$$C_P = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 20,155 \cdot 10^6} = 7,89 \cdot 10^{-12} \text{ [F]} \quad (6.12)$$

$$C_P = 7,89 \text{ [pF]} \quad (6.13)$$



Obrázek 6.7 Graf závislosti unikajícího proudu na frekvenci pro vybrané transformátory v bodě 6.7.4

Po vynesení závislostí unikajícího proudu na frekvenci pro vybraný transformátor a zadaný vadný transformátor je možné pozorovat, že unikající proud transformátoru se sníženou izolací je mnohonásobně větší. Z důvodu velkého rozdílu unikajícího proudu byla svislá osa s hodnotami tohoto proudu vynesena s logaritmickou stupnicí tak, aby šlo na první pohled zaznamenat, jak velký rozdíl mezi unikajícími proudy pro dané parazitní kapacity je.

6.8 Kontrolní otázky

1. Co je to unikající proud?
 - Unikající proud obsahuje dvě složky, první je proud konstrukční, který uniká do země a neživých částí v normálních podmínkách. Druhou složkou je poruchový proud, který uniká v případě poruchy. Projevuje se dvěma stavy, podle jejich působení. U spotřebičů s třídou ochrany I (základní izolace jako základní ochrana a ochranné pospojování jako ochrana při poruše) je to proud, unikající ochranným vodičem. U spotřebičů s třídou ochrany II (také základní izolace, a navíc přídavná nebo zesílená izolace) je to dotykový proud, protékající přes obsluhu nebo pacienta do země. Zejména při přímém kontaktu živé části přístroje při zákroku je nezbytné zamezit překročení hraniční hodnoty unikajících proudů.
2. Jak velký unikající proud smí dle normy protékat spotřebiči s třídou ochrany I a spotřebiči s třídou ochrany II a v jaké normě je to stanoveno?
 - Unikající proud obecně nesmí přesáhnout hodnotu 3,5 mA pro spotřebiče s třídou ochrany. Dále však je uvedena podmínka pro přístroje informační techniky držené v ruce na hodnotu 0,75 mA.
 - Pro spotřebiče s třídou ochrany II je stanovena hranice 0,5 mA.
3. Popište vzájemnou závislost unikajícího proudu transformátorem a frekvence napájecího signálu.
 - Zvyšování frekvence napájecího napětí má za následek zvyšování unikajícího proudu. To je způsobeno kapacitní reaktancí parazitní kapacity, ta totiž nepřímo úměrně závisí na frekvenci. Tedy jestliže se zvyšuje frekvence napájecího signálu, snižuje se kapacitní reaktance (odpor) kondenzátoru, což má za následek větší protékající proud.

6.9 Závěr

Obvod byl zapojen dle schéma zapojení pro měření přímou a nepřímou metodou. Následně byla otestována funkčnost zesilovače, změřená hodnota výstupního napětí zesilovače byla zaznamenána do protokolu a přepočtena pro určení koeficientu K_s . Následně byl pro všechny připravené transformátory změřen úbytek napětí na rezistoru, který byl přepočten na proud, který přes parazitní kapacity mezi primárním vinutím a jádrem protékal až na kostru transformátoru. Výsledná hodnota unikajícího proudu u všech 3 transformátorů byla vyhodnocena jako bezpečná. Dále jsem zjistil, že unikající proud přes parazitní kapacity transformátoru závisí na frekvenci napájecího signálu. Čím byla tato frekvence vyšší, tím větší byl unikající proud. Při metodě přímého měření byly hodnoty unikajícího proudu nižší než při metodě nepřímé, vliv na toto měření mělo zapojení napájecího napětí. V posledním bodě byl

porovnán naměřený transformátor se zadanými hodnotami ilustrující transformátor s poškozenou izolací. Unikající proud byl u takového transformátoru mnohonásobně vyšší.

7 Zhodnocení dosažených výsledků

První dvě kapitoly této práce se zabývaly konstrukcí transformátoru z hlediska jeho mnoha dělení, dále byla popsána funkčnost izolačního transformátoru s následným doplněním jeho využití v biomedicině. Navazujícím tématem bylo seznámení s normami používanými ve zdravotnictví a normami popisující unikající proudy. Nejběžnějšími metodami měření unikajících proudů jsou metoda přímá, nepřímá a rozdílová. Tyto metody byly ke konci druhé kapitoly popsány a dále vyhodnoceny pro jejich další použití v bakalářské práci.

Kapitola 4 pojednává o návrhu koncepce laboratorní úlohy a výběrem členů pro následná měření. Z důvodu bezpečnosti studentů ve výuce nebylo možné měření transformátory připojit na síťové napětí. Transformátory byly tedy napájeny nižším napětím. Jelikož byl jako generátor signálu použit generátor osciloskopu, bylo potřeba sestavit zesilovač pro zesílení signálu. Zesilovač byl, po seznámení s možnostmi, vybrán audio zesilovač TDA2030, který byl skrze stavebnici sestaven a otestován. Jeho vedlejším zpestřením úlohy je slyšitelný tón při zvyšující se frekvenci napájecího napětí. Při použití zmenšeného napájecího napětí však vznikl problém, jelikož již tak malé hodnoty unikajícího proudu se zmenšily na jednotky μA . Pro otestování předpokladů byl sestaven obvod, na kterém byla otestována funkčnost principu měření unikajících proudů přes parazitní kapacity. Následným zvyšováním frekvence napájecího signálu se zmenšovala kapacitní reaktance parazitní kapacity, a tedy tekla vyšší unikající proud. Při měření nebyl záměrně využit klasický multimetr, jelikož bylo potřeba měřit unikající proudy na mnohem vyšších frekvencích nežli na síťových 50 Hz. Jako měřené transformátory byly použity 3 transformátory s příkonem do 100 VA, a to kvůli jejich hmotnosti a nižšímu jmenovitému proudu a napětí. Jelikož transformátory neměly informační štítky, bylo potřeba proměřit jednotlivá vinutí a orientačně vypočítat další užitečné hodnoty. Dále byl sestaven návrh měření přímou a nepřímou metodou unikajících proudů pro laboratorní úlohu. Pro demonstraci transformátoru s poškozenou nebo sníženou izolací byl sestaven v programu falstad obvod s kapacitou 10 pF, která tento transformátor představovala.

Realizaci navržených měření popisuje kapitola 5. Zde byly dle postupu proměřeny unikající proudy na třech připravených transformátorech a byly vyneseny závislosti unikajících proudů na frekvenci pro konkrétní transformátory. Následně byly obě metody měření porovnány a vyhodnoceny. Unikající proudy byly také porovnány s normou udanou maximální hodnotou. Dále byla pro všechny 3 transformátory srovnávána závislost unikajícího proudu na frekvenci s transformátorem se simulovanou vadou ve vinutí. Tímto srovnáním bylo porovnáno, jak by se mohla měnit velikost unikajícího proudu při zhoršené izolaci vinutí transformátoru.

V posledním bodě byla sestavena laboratorní úloha pro měření ve výuce. Cílem laboratorní úlohy bylo seznámit studenty s veličinou zvanou unikající proud, tedy v jakém případě by tento proud mohl být pro člověka nebezpečný a co může způsobovat jeho nárůst. Student by měl při řešení této úlohy lépe pochopit vážnost unikajících proudů, a to z hlediska

nebezpečí, které tato veličina může způsobit. Měl by se také lépe orientovat v normě udávající maximální hodnoty unikajících proudů a pochopit závislost unikajícího proudu na frekvenci napájecího napětí. Dále by měl mít student povědomí o využití izolačních transformátorů v biomedicině, tedy v napájecích sítích i samostatných přístrojích využívaných například při operacích.

Měřicí obvod, obsahující transformátory a zesilovač TDA2030, bude ještě uzavřen do upravené krabičky, která bude na své horní straně obsahovat vstupy pro konektory a popisy daných vstupů. Po stranách krabičky bude odvětrávání pro zesilovač.

8 Použitá literatura

- [1] LINHART, Tomáš. *Obecná teorie transformátorů* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/irlmpr>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.
- [2] MAJLING, Eduard. *Transformátor – základní vlastnosti a dělení*. OENERGETICE.CZ [online]. Praha: Eduard Majling, 2015 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni>.
- [3] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 221 s. ISBN 80-708-2221-X.
- [4] Petrov G. N. *Elektrické stroje 1, Úvod – Transformátory*. 3. dopl. vyd. Praha: Academia, 1980
- [5] KOČMAN, Karel. *Elektrické stroje a přístroje I: učebnice pro 3. ročník studia oboru 26-61-6 Zařízení silnoproudé elektrotechniky na středních průmyslových školách*. Praha: SNTL, 1990, 420 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [6] Bašta, J.; Chládek, J.; Mayer, I.: *Teorie elektrických strojů*, SNTL Praha 1968.
- [7] NEVŘIVÝ, T.: *Modelování jednofázového transformátoru malého výkonu*, [online], Brno, 26.5.2011, [cit. 2020-01-01], Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40764, Bakalářská práce, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Ing. Ondřej Vitek, Ph. D
- [8] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Transformátor [online]. 2012 [cit. 2020-01-01]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Transform%C3%A1tor&oldid=8526872>
- [9] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008, 168 s. ISBN 978–807043-724-7.
- [10] KONÍČEK, Václav. *Elektrické stroje* [online]. [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-strojeapristroje/transformatory.pdf>
- [11] Základy elektroinženýrství. In: [online]. [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: http://moje.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=27639
- [12] GES Electronics [online]. [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/zdrojenabijece-menice-trafa/transformatory-sitove/sitovetoroidni/XKA3.html>

- [13] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Galvanické oddělení [online]. 2012 [cit. 2020-01-01]. Dostupný z WWW: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Galvanick%C3%A9_odd%C4%9Blen%C3
- [14] JUDAS, J. Testování ochrany transformátoru, [online], Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009, [cit. 2020-01-01], Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17287, 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
- [15] Teoretický rozbor ochrany a jištění. In: [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/ochrany/Ochrany-%favod.pdf
- [16] GRYM, Rudolf, Petr HOCHMAN, Jiří BERMAN, Josef MACHOŇ a Břetislav CICHONĚ. *Chránění II: elektrická zařízení vysokého napětí, chránění zařízení v průmyslu*. Havířov: IRIS, 2004. ISBN 80-903540-0-9.
- [17] ŠEVČÍK, Ing. Robert. *Měření unikajících proudů ZP*. Elekrika.cz [online]. PURO – KLIMA, 2013, 2013 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/mereni-unikajicich-proudu-zp>
- [18] VAŇUŠ, Ing. Jan. *Měření unikajících a dotkových proudů u spotřebičů* [online]. 7. měření. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2006 [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/BC_FBI/navody%20FBI/dotyk_proudy.pdf
- [19] Illko, s.r.o. *Návod Revex 51* [online]. Blansko: Illko, 2003 [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://www.illko.cz/images/dokumenty/navod-revex51.pdf>
- [20] DASHÖFER, Verlag. *Základní ochrana v sítích, ochrana automatickým odpojením od zdroje, doplňující ochrana a přístroje jejich zajištění* [online]. Praha: Stavebníklub.cz, 2013, 2013 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.stavebniklub.cz/33/zakladni-ochrana-v-sitich-ochrana-automatickym-odpojenim-od-zdroje-doplnujici-ochrana-a-pristroje-jejich-zajisteni-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EsriOTq34uiL3QrrmAHliVA/>
- [21] *Monitorování a řízení napájení zdravotnických prostorů* [online]. Brno: GHV Trading, spol. s r.o., 2012, 2012(6) [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/24233797-Medics-monitorovani-a-izeni-napajeni-zdravotnickych-prostoru-katalog-vyrobu-bender-medics-monitorovani-a-izeni-napajeni-zdravotnickych-prostoru.html>
- [22] KEMPA, M. *Elektrické zkoušky v diagnostice transformátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martina Šimková.

- [23] STŘELEČEK, Petr. *NFZS16. NF Zesilovač s obvody TDA2030, TDA2030A, TDA2040, TDA2050, TDA2051* [online]. 2003, 2003, 2003(NFZS16) [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.jerrycb.wz.cz/schemata/nfzs16.htm>
- [24] *TDA2030: 14W Hi-Fi AUDIO AMPLIFIER* [online]. Itálie: STMicroelectronics, 1998 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=041493310d031fd7fb0045f35673b8f3ab6124&type=M&term=TDA2030>
- [25] *Výpočet jednofázového transformátoru: Elektrické stroje a přístroje pro E3* [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/V%C3%BDpo%C4%8Det-transform%C3%A1toru-zjednodu%C5%A1en%C3%BD.pdf>
- [26] PISKAČ, Václav. *Měření kapacity*. Fyzikalnisuplik [online]. Brno, 2010, 2010 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: http://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/skolnipomucky/mereni_kapacity.pdf

Seznam příloh

Příloha A: Obvod pro simulaci unikajícího proudu pro vadný transformátorI

Příloha A: Obvod pro simulaci unikajícího proudu pro vadný transformátor

Kód pro vložení do <https://www.falstad.com/circuit/>

\$ 1 0.000005 0.37936678946831776 89 5 43 5e-11

v 128 288 128 192 0 1 1000 230 0 0 0.5

c 192 160 288 160 0 1e-8 5.714467106472966 0.001

w 128 192 128 160 0

w 128 160 192 160 0

w 128 288 320 288 0

w 320 192 320 160 0

w 320 160 288 160 0

r 320 192 320 288 0 830000

o 1 1 0 4099 10 0.000390625 0 2 1 3

o 7 1 0 4099 320 0.000390625 1 2 7 3